

Школа **Инженерная школа новых производственных технологий**  
 Отделение школы (НОЦ) **Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера**  
 Направление подготовки **18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии**

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Модернизация технологической схемы получения активных веществ для производства металлопористых термоэффективных катодов с разработкой основного оборудования УДК <u>546.05-026.12:621.3.032.21</u>

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<b>4KM81</b>	Тасмасыс Дмитрий Сергеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Швалев Юрий Борисович	К.Т.Н., доц		

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук Ирина Владимировна	К.Т.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романцов Игорь Иванович	К.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	К.Т.Н., доц		

Томск – 2020г.

**Планируемые результаты обучения по ООП 18.04.02 выпуска 2020 г.**

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
P1	Осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ), <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам»
P2	Осуществлять управление проектом на всех этапах его жизненного цикла	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 - «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам», 28.004 «Инженер-проектировщик установок для утилизации и обезвреживания медицинских и биологических отходов»
P3	Организовывать и руководить работой команды, вырабатывать командную стратегию для достижения цели	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 - «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам»,
P4	Применять современные коммуникативные технологии в том числе на иностранном языке (-ах) для академического и профессионального взаимодействия	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 - «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам», 01.004 «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования»
P5	Проводить анализ и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 01.004 «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования»
P6	Определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности, разрабатывать способы ее совершенствования на основе самооценки	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 01.004 «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования»
P7	Формулировать, разрабатывать и реализовывать	Требования ФГОС ВО, СУОС, <i>CDIO</i>

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
	методы решения научно-исследовательских задач, в области проектирования и конструирования энерго и ресурсоэффективных химических, нефтегазоперерабатывающих и нефтехимических производств, представлять и защищать результаты	<i>Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 28.004 - «Инженер-проектировщик установок для утилизации и обезвреживания медицинских и биологических отходов», 40.011- «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам»
Р8	Проводить все стадии проектирования с использованием компьютерного 3-х мерного моделирования, коммерческих симуляторов и пакетов прикладных программ, в области проектирования и конструирования энерго и ресурсоэффективных химических, нефтегазоперерабатывающих и нефтехимических производств, представлять и защищать результаты	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011- «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам», 19.002 - «Специалист по химической переработке нефти и газа», 19.003 - «Специалист по обслуживанию и ремонту нефтезаводского оборудования»
Р9	Формулировать, разрабатывать и реализовывать методы решения научно-исследовательских задач, в области проектирования и конструирования энерго и ресурсоэффективных химических, нефтегазоперерабатывающих и нефтехимических производств	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам », 19.00- «Специалист по химической переработке нефти и газа», 19.003 «Специалист по обслуживанию и ремонту нефтезаводского оборудования», 19.008 «Специалист по диспетчерско-технологическому управлению нефтегазовой отрасли»

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки 18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4KM81	Тасмасыс Дмитрий Сергеевич

Тема работы:

Разработка технологического оборудования для получения экстракта из чаги

Утверждена приказом директора (дата, номер)

62-11/с от 02.03.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Объемный расход реактора – 100л/ч;</li> <li>- Температура процесса осаждения - 50 °С;</li> <li>- Температура воды в рубашке реактора 70°С;</li> <li>- рН процесса осаждения 6,5 -7,5;</li> <li>- Давления в теплообменнике – 0,2 МПа;</li> </ul>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Введение</p> <p>1. Литературный обзор</p> <p>2 Теоретические и экспериментальные исследования</p> <p>3 Описание технологической схемы</p> <p>4 Конструирование и расчет оборудования</p> <p>5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p> <p>6 Социальная ответственность</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Лист 1 – Технологическая схема (А<sub>1</sub>);</p> <p>Лист 2 – Общий вид реактора для непрерывного осаждения (А<sub>1</sub>);</p> <p>Лист 3 – Общий вид оборудования реактора (А<sub>1</sub>);</p> <p>Лист 4 – Общий вид теплообменного аппарата (А<sub>0</sub>);</p> <p>Лист 5 – Общий вид оборудования теплообменника (А<sub>1</sub>);</p> <p>Лист 6 – Экономические показатели (А<sub>1</sub>).</p> <p>Лист 7 – Общий вид экстрактора (А<sub>1</sub>);</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Кашук И.В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Романцов И.И.</p>
<p>Английский язык</p>	<p>Диденко А.В.</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Литературный обзор</p>	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	<b>02.03.2020</b>
-------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Швалев Юрий Борисович	к.т.н.		02.03.2020

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM81	Тасмасыс Дмитрий Сергеевич		02.03.2020

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4KM81	Тасмасыс Дмитрий Сергеевич

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	им. Н.М. Кижнера
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Определены стоимость материальных ресурсов, специального оборудования согласно рыночным ценам г. Томска; тарифные ставки исполнителей научного исследования согласно штатному расписанию НИ ТПУ.
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Определены отчисления во внебюджетные фонды

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	Анализ конкурентных технических решений рынка. Выполнение SWOT-анализа проекта.
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР	Составлена структура работ, определена трудоемкость, разработан график проведения научного исследования.
3. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	Рассчитан бюджет научного исследования
4. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков	Определены интегральный финансовый показатель, интегральный показатель ресурсоэффективности, интегральный показатель эффективности.

**Перечень графического материала** (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности ИП

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
------------------------------------------------------	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук Ирина Вадимовна	К.Т.Н. доцент		10.02.20

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM81			10.02.20

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4КМ81	Тасмасыс Дмитрий Сергеевич

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	им. Н.М. Кижнера
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Тема ВКР:

Разработка технологического оборудования для получения экстракта из чаги	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p><b>Объект исследования</b> – активное вещество для металлопористых термоэлектронных кабтодов.</p> <p><b>Рабочая зона</b> – производственный цех. Технологический процесс включает в себя следующие виды работ: сбор и транспортировка сырья, инспекция качества сырья, фильтрация сырья, сушка сырья в сушильном шкафу, прокаливание, упаковка и отгрузка.</p> <p><b>Области применения</b> – в СВЧ приборах.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<p>Правовое обеспечение и организационные мероприятия согласно ГОСТ 12.4.299-2015 и ТК РФ от 30.12.2001 197-ФЗ.</p> <p>Законодательные и нормативные документы по теме:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Федеральный закон № 426-ФЗ от 28.12.2013 г.;</li> <li>2. СанПиН 2.2.4.548-96;</li> <li>3. ГОСТ 12.1.003-83;</li> <li>4. СН 2.2.4/2.1.8.566-96;</li> <li>5. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03;</li> <li>6. ГОСТ 12.1.002-84;</li> <li>7. ГОСТ Р 22.0.01-2016;</li> <li>8. ГОСТ 12.0.004-90;</li> <li>9. Федеральный закон № 123-ФЗ от 22.07.2008 г.;</li> <li>10. Конституция Российской Федерации;</li> <li>11. ГОСТ 12.0.003-2015;</li> <li>12. СанПиН 2.2.4.3359-16;</li> <li>13. Р 2.2.2006-05;</li> <li>14. ГОСТ 12.1.038-82;</li> <li>15. Федеральный закон № 184-ФЗ от 27.12.2002 г.;</li> <li>16. ГОСТ 34347-2017;</li> <li>17. ГОСТ 12.2.003-91.</li> </ol>
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению	<p>Выявить вредные факторы в производственном цеху: освещенность, шум, вибрации, микроклимат;</p> <p>Рассмотреть:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• требования к технике безопасности при работе с производственным оборудованием;</li> <li>• влияние психофизиологических факторов: монотонность</li> </ul>



воздействия	<p>труда, физические и эмоциональные перегрузки, умственное перенапряжение;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>предлагаемые средства индивидуальной защиты для работы с производственным оборудованием: коллективная защита (пылеуловители, вентиляция), индивидуальные средства защиты (перчатки, респираторы, очки).</li> </ul> <p>Выявить опасные факторы, относящиеся к оборудованию: повышенная температура рабочих поверхностей; электрический ток; короткое замыкание; движущиеся машины и механизмы. Предлагаемые средства защиты: перчатки, спецодежда.</p>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	<p>Рассмотреть:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>правила утилизации отработанного сырья и сырья, не прошедшего инспекционный осмотр;</li> <li>утилизация ТБО, люминесцентных ламп.</li> </ul>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<p>Определить перечень наиболее возможных чрезвычайных ситуаций: возникновение пожара, взрыва вакуумной аппаратуры; разрушение зданий в результате разрядов атмосферного электричества.</p> <p>Наиболее актуальная ЧС – возникновение пожара.</p> <p>Рассмотреть профилактические мероприятия, требования к безопасности и меры по ликвидации её последствий:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>использование огнетушителя, песка, асбестового одеяла, пожарного крана и щита;</li> <li>обеспечение средствами индивидуальной защиты;</li> <li>организационная эвакуация работников.</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	02.03.2020
------------------------------------------------------	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романцов Игорь Иванович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM81	Тасмасыс Дмитрий Сергеевич		

## Реферат

Выпускная квалификационная работы «Технология синтеза активных веществ для металлопористых термоэлектронных катодов»

Ключевые слова: реактор, термоэлектронные катоды, активное вещество, непрерывное осаждение, мешалка лопастная.

Объектом работы является непосредственно разработка технологии и расчет реактора с перемешивающим устройством и теплообменного аппарата.

Цель работы – расчет реактора с перемешивающим устройством для осуществления непрерывного осаждения, расчет теплообменника для нагрева воды, подбор оборудования для технологии получения активных веществ.

В ходе выполнения работы были произведены все необходимые расчеты для конструирования аппаратов, определены их размеры и основные механические характеристики.

Реактор непрерывного осаждения с перемешивающим устройством: диаметр цилиндрической обечайки 400 мм, консольный вал 340мм соответственно, диаметр перемешивающего устройства 250 мм, мешалка лопастная, диаметр вала 40 мм, вертикальный.

Теплообменник для нагрева воды в рубашку реактора : диаметр 325 мм, площадь теплообмена  $7\text{ м}^2$ , число труб 62 шт, высота аппарата 1,7 м, вертикальный.

Степень внедрения: процесс непрерывного осаждения для синтеза активных веществ для металлопористых катодов.

Область применения: химическая промышленность.

В ходе работы было подтверждено, что рассчитанное оборудование соответствует всем предъявляемым технологическим характеристикам.

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	13
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	15
1.1 МПК и способы их изготовления .....	15
1.2 Активные вещества для металлопористых катодов.....	16
1.3 Схема экспериментальной установки .....	22
1.4 Результаты и их обсуждение .....	23
2 Технологическая схема получения активных веществ для металлопористых катодов .....	28
3 Технологический расчет .....	29
3.1 Материальный баланс реактора для непрерывной технологии синтеза активных веществ .....	29
3.2 Гидродинамический расчет аппарата без внутренних устройств .....	30
3.3 Материальный баланс кожухотрубчатого теплообменника для нагрева воды в рубашку реактора .....	32
3.4 Расчет обечайки корпуса аппарата .....	34
3.5 Подбор и расчет толщины крышки и днища .....	35
3.6 Толщина трубных решеток.....	36
3.7 Расчет и подбор патрубков и фланцев.....	38
3.8 Расчет опорных лап .....	40
3.9 Материальный баланс процесса фильтрования суспензии .....	42
4 Механический расчет .....	47
4.1 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки .....	47
4.2 Расчёт толщины стенки эллиптического днища .....	49
4.3 Расчет плоской крышки .....	51
4.4 Расчёт толщины стенки гладкой теплообменной рубашки.....	54
4.5 Расчёт сопряжения обечайки корпуса и днища.....	57
4.6 Расчёт сопряжения обечайки рубашки и днища .....	61
4.7 Расчёт фланцевого соединения корпуса с крышкой .....	64
4.8 Расчет вала для перемешивающего устройства реактора .....	72
4.9 Укрепление отверстий .....	80
4.10 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки теплообменника .....	83
4.11 Расчёт толщины стенки эллиптической крышки и днища .....	86
4.12 Расчёт сопряжения обечайки корпуса и днища.....	87

4.13 Укрепление отверстий .....	102
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	106
5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	106
5.2 Планирование научно-исследовательских работ .....	112
5.3 Бюджет научно- исследования .....	125
5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	129
6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	132
6.1 Правовые нормы трудового законодательства .....	132
6.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны .....	133
6.3 Производственная безопасность .....	134
6.4 Анализ выявленных опасных производственных факторов.....	135
6.5 Анализ выявленных вредных производственных факторов .....	137
6.6 Экологическая безопасность .....	141
6.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	142
Заключение.....	143
Список публикаций студента .....	145
Список литературы:.....	146
Social responsibility .....	152

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при производстве электровакуумных СВЧ приборов на многих предприятиях электронной промышленности применяют металлопористые катоды на основе вольфрамовой губки[1], пропитанной алюминатом бария – кальция состава  $2,5\text{BaO} \cdot 0,4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ .

В общем случае металлопористые катоды с несколько различающимися составами применяются в электровакуумных приборах мощных импульсных многолучевых клистронах (с отбором тока до  $30 \text{ А/см}^2$  и долговечностью до нескольких тысяч часов), в лампах бегущей волны - ЛБВ (с отбором тока на постоянном режиме до  $2 \text{ А/см}^2$  и долговечностью более 50 тыс. часов), а также в лампах обратной волны – ЛОВ[2] (при импульсном токоотборе до  $50 \text{ А/см}^2$  и долговечности до 1000). Плотность тока термоэмиссии такого катода при температуре  $1050 - 1100^\circ\text{С}$  составляет  $10 - 15 \text{ А/см}^2$ . Основой катода является активное вещество, которое определяет основные параметры и свойства катода.

Активное вещество, заполняющее поры губки катода, представляет собой химическое соединение оксида бария с кислотными и амфотерными оксидами некоторых элементов[3]. При взаимодействии активного вещества с металлом губки (восстановителем) оно выделяет свободный барий, который и активирует катод. Исходным сырьем для активных веществ металлопористых катодов являются: карбонат бария ( $\text{BaCO}_3$ ), карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) и оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Для изготовления эмиттера металлопористых катодов (МПК) используется вольфрамовый порошок, из которого изготавливают каркасы, пропитываемые активным веществом.

По способу введения активного вещества в вольфрамовую губку различают прессованные и импрегнированные катоды.

Существует несколько способов приготовления активных веществ, основными из которых являются[4,5]:

- классический способ прокаливания смеси карбонатов бария и кальция;
- золь – гель технология;
- метод полунепрерывного осаждения;
- метод непрерывного осаждения и др.

Каждый из методов получения активных веществ позволяет получить одинаковый по составу конечный продукт, но различный по своим свойствам. Следовательно, получение активного вещества с заданными, стабильными, и воспроизводимыми характеристиками фазового состава, являются актуальными. В настоящее время активные вещества для промышленных катодов получают либо твердофазным синтезом, либо периодическим методом осаждения, но эти методы не позволяют получать активные вещества требуемого качества, что в дальнейшем негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках металлопористого катода.

Метод непрерывного осаждения обладает рядом преимуществ перед остальными методами, так как позволяет получить продукт со стабильными воспроизводимыми характеристиками и высокой чистотой продукта, что и определило выбор этого метода в данной работе.

При формировании фазового состава любого активного вещества необходимо знать химизм и механизм процесса. Например, исходными веществами для получения  $\text{Ba}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ,  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  являются оксиды этих металлов, которые в свою очередь могут быть получены из соответствующих солей или гидроксидов. Метод непрерывного осаждения

позволяет синтезировать как индивидуальные соединения, так и бинарные и тройные системы. Первой целью данной работы являлось получение индивидуальных солей бария, кальция, алюминия, исследование процесса их термического разложения, определение фазового состава прокаленных веществ. Эти данные необходимы для исследования формирования бинарных(барий алюминий) и тройных(барий кальций алюминий) систем, что необходимо при разработке непрерывной технологии синтеза активных веществ для металлопористых термоэлектронных катодов.

Основным аппаратом любой технологической схемы получения активных веществ является химический реактор. Данный аппарат должен обеспечивать постоянство технологических параметров по всему его объему, что является необходимым условием для получения активных веществ. Поэтому вторая цель данной работы – обоснование, выбор и расчет реактора для процесса непрерывного осаждения в технологии активных веществ для металлопористых термоэлектронных катодов. Данным требованиям отвечает реактор идеального смешения, который характеризуется абсолютно полным выравниванием всех параметров по всему объему аппарата, что в данной работе и явилось основанием для выбора и расчета такого типа реактора заданной производительности.

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В данной главе будут описаны основные разновидности МПК и свойства активных веществ, способы их получения.

## 1.1 МПК и способы их изготовления

Металлопористые катоды (МПК) заняли прочное место в производстве электровакуумных приборов. Практически все производимые в мире усилители, на базе ламп бегущей волны (ЛБВ) или обратной волны (ЛОВ), наземной и космической связи, изготовлены на основе МПК. Используют для радиолокации, телевидения, сотовой связи с целью получения электронного эмиссионного потока[2,6] и др.

Существует несколько основных разновидностей катодов показанных на рисунке 1.1[7].

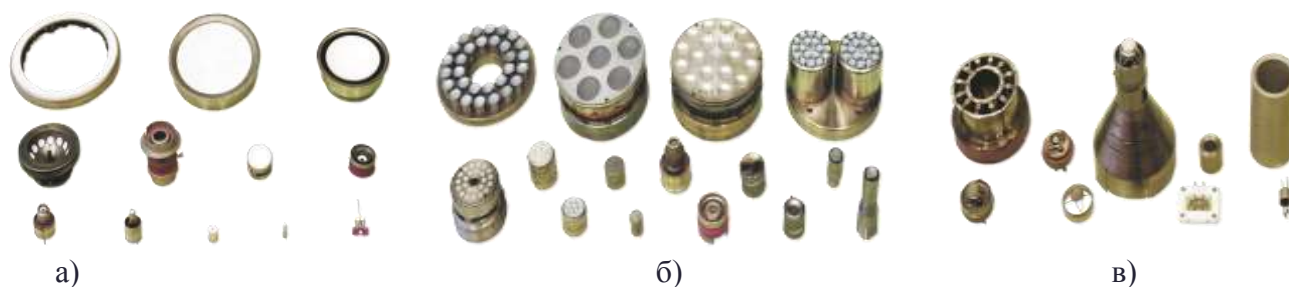


Рисунок 1.1–Разновидности катодов[7]: *а* – оксидные катоды; *б* – металлопористые катоды; *в*–металлосплавные катоды

МПК – это катоды, эмитирующий слой которых представляет собой пористую губку из тугоплавкого металла (как правило, вольфрама), помещенную в молибденовый «стакан» [8].

Поступающие щелочноземельные металлы и окислы этих металлов через поры губки образуют монослой на эмитирующей поверхности типа Ва-О-W[9], обладающий низкой работой выхода.

В настоящее время, на стадии разработки, существует технология изготовления МПК[5], в которой при изготовлении катода применяют нанокремниевый материал. Внедрение материала в матрицу катода может изменить механизм и скорость протекания трехфазных реакций образования активных элементов и кислорода и, следовательно, улучшить его эмиссионные свойства.

Перспективными материалами для катодов являются сплавы благородных металлов (Pd, Pt, Ir) с редкоземельными (Ir, Ce, La) и др.

Конструкция металлопористого (пропитанного) катода представлена на рисунке 1.2. Он представляет собой губку из тугоплавкого металла (W, Mo, Re), поры которой пропитываются активным веществом (алюминатом бария, кальция). Пропитка осуществляется путем нанесения дозированного количества активного вещества и пропитки им губки при температуре 1700-1800°С в водородной среде. После пропитки избыток

активного вещества, оставшийся на поверхности губки и на стенках корпуса, удаляют путем механической обработки, в результате чего происходит завальцовывание пор [11]. Для вскрытия пор применяют способ ионно-плазменного травления поверхности [12], или метод воздействия на поверхность импульсным лазерным излучением [13]. В результате лазерного воздействия происходит вскрытие завальцованных пор с обеспечением формирования равномерно распределенных по эмитирующей поверхности микроотверстий. Этот способ обеспечивает получение металлопористых катодов с идентичными по размерам микроотверстиями на одинаковом расстоянии микроотверстий друг от друга. Технический результат - повышение равномерности распределения микроотверстий по эмитирующей поверхности катода, идентичности их геометрических размеров, увеличение эмиссионной способности катода, упрощение и сокращение времени процесса изготовления катода. Далее идет крепление губки 2 к молибденовому корпусу 1 (керну) с помощью завальцовки, пайки, либо спекания. Тепло от нагревателя 3 (вольфрамовая нить накала) передается на вольфрамовую губку 2 в основном за счет излучения, что способствует равномерному нагреву [13]

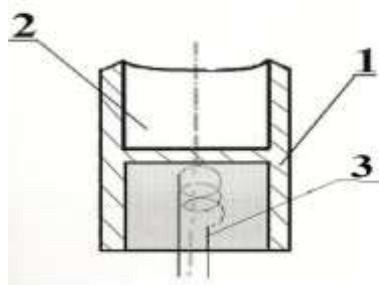


Рисунок 1.2 - Конструкция МПК: 1-Корпус, 2-металлопористая губка, 3-нагревательный элемент [9]

По способу получения активного вещества МПК бывают[9]:

- прессованные;
- пропитанные;
- прессовано-пропитанные.

## 1.2 Активные вещества для металлопористых катодов

Активное вещество, заполняющее поры губки катода, представляет собой химическое соединение оксида бария с кислотными и амфотерными оксидами некоторых элементов[3].

Важным условием стабильной работы катода является правильный подбор активного вещества. Активное вещество должно обладать следующими основными свойствами [14]:

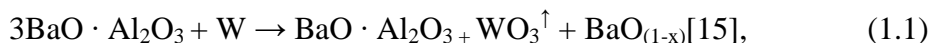
- способностью выделять необходимое количество активатора (бария) при взаимодействии с восстановителем;
- незначительным выделением газов при обработке катода;
- достаточной устойчивостью на воздухе;



- заданной температурой плавления.

На этапе активирования катода при температуре, превышающей рабочую температуру катода, образование кристаллов оксида бария может происходить лишь в результате взаимодействия алюминатов бария с вольфрамом.

Из-за термодинамических ограничений прямое разложение алюминатов на оксиды бария и алюминия невозможно. Выделение оксида бария также затруднено в результате взаимодействия алюминатов с вольфрамом из-за летучести оксида вольфрама. При этом происходит «унос» кислорода из оксида бария оксидом вольфрама [15] и обуславливает формирование в оксиде бария кислородных вакансий, ответственных за его термоэмиссионные свойства. Условно данную реакцию можно записать в виде



где  $x$  – отклонение оксида бария от стехиометрии, а стрелка у оксида вольфрама указывает на переход его в газовую фазу [15], что, по принципу Ле Шателье - Брауна, сдвигает реакцию (1.1) вправо.

В зависимости от состава исходной оксидной фазы, которой пропитывается вольфрамовая матрица, и температуры стоящий слева в реакции (1.1) алюминат может быть вида [15]



или их эвтектической смеси, где В – BaO, А – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, причем фазы в ряду расположены в порядке увеличения содержания оксида бария. При этом каждая участвующая в реакции (1.1) фаза превращается в фазу, расположенную левее в ряду (1.2). Аналогично реакции (1.1) в металлопористом катоде может протекать и реакция взаимодействия алюмината кальция с вольфрамом с образованием нестехиометричного оксида кальция и летучего оксида вольфрама, а в осмированных катодах – взаимодействие алюминатов бария и кальция с осмием с образованием нестехиометричных оксидов бария и кальция и летучего оксида осмия.

Таким образом, схему катодного материала на этапе его активирования и работы можно представить в виде [16], показанном на рисунке 1.3, где 1 – вольфрам, 2 – алюминат, 3 – образующиеся кристаллиты оксида бария, 4 – поры в материале, а – средний размер кристаллитов оксида бария, D – среднее расстояние между кристаллитами.

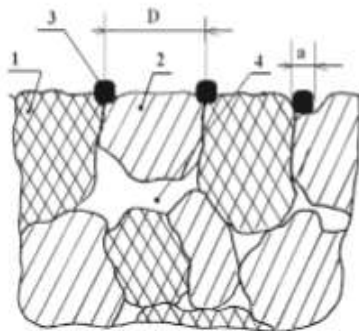


Рисунок 1.3 - Схема формирования кристаллитов оксида бария в металлопористом катоде [16]

Оптимальная величина открытого порового канала также зависит от активности реакции взаимодействия импрегнирующего вещества с вольфрамом [17], в результате которой в объеме катода создается давление.

К менее активным алуминатам можно отнести составы:  $3\text{BaO} \cdot 0,5\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ; к более активным:  $3\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  и алуминаты, отоженные в кислой атмосфере [17], содержащей углекислый газ  $\text{CO}_2$ .

В катодных узлах, в которых возможна бомбардировка поверхности катода остаточными газами, что приводит к повышению распыления Ва ↑, целесообразно использовать каркасы с меньшей плотностью, как, например, в работе [17], и большей проницаемостью ( $0,44\text{--}0,48 \text{ кг/см}^2$ ). В этом случае плотность каркасов рассчитывают следующим образом[18]:

$$\rho_{\text{сп}} = (12,35 - 0,03 D_{\text{ч}} + 0,05 D_{\text{ч}}^2) - 0,6 \quad (1.3)$$

При применении более активного импрегнирующего вещества [18] или, например, свежеприготовленного алумината  $3\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  целесообразно использовать менее проницаемые для распыления Ва ↑ каркасы с плотностью

$$\rho_{\text{сп}} = (12,35 - 0,03 D_{\text{ч}} + 0,05 D_{\text{ч}}^2) + 0,6 \quad (1.4).$$

В качестве активных веществ чаще всего используется системы окислов:  $\text{BaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO} + \text{TiO}_2$ ,  $\text{BaO} + \text{ThO}_2$ ,  $\text{BaO} + \text{WO}_3$ ,  $\text{BaO} + \text{Cr}_2\text{O}_3$ .

В таблице 1.1 показано изменение средних диаметров частиц вольфрамовых порошков и их активности при повышенных температурах.

В качестве параметров контроля приведены [19]:

- $D_{\text{ч}}$  – средний диаметр частиц;
- $P$  – давление протекания воздуха через пробную таблетку;
- $\Delta V / V$  – усадка каркаса пробной таблетки при спекании.

Таблица 1.1 - Характеристики вольфрамовых порошков и W-каркасов катодов [19]

Параметр контроля	Марка порошка									
	В4ДК фр. Б					В4ДК фр. А				
	Исх.	1650°	1675°	1700°	1750°	Исх.	1650°	1675°	1700°	1750°
$D_{\text{ч}}$ , мкм	1,69	4,15	4,49	4,85	5,0	4,10	5,45	5,62	6,30	6,73
$P$ , кг/см <sup>2</sup>	1,22	0,505	0,46	0,45	-	0,74	0,41	0,39	0,37	0,34
$\Delta V / V$ , %	26	13,0	11,7	11,2	-	13,3	11,6	10,0	8,9	7,7

Отжиг при температуре 1650°С способствует исчезновению субмикронной фракции, изменению тонкой структуры частиц и, следовательно, дезактивации порошка[19], что выражается в снижении усадки W-каркасов при спекании. Однако полное протекание этого процесса при температуре 1650 °С не происходит в вольфрамовых промышленных порошках со средним диаметром частиц: 3,5..4,5 мкм, а в более мелких порошках с  $D_{\text{ч,исх}}$ , от 1 до 3,5 мкм. И только многоступенчатый отжиг с конечной температурой 1700°С приводит к сравнительному выравниванию величины усадки таблеток из порошков разных марок от 8,9 до 11,7 %.

Еще большая дезактивация порошка[19] происходит при его обработке с температурой 1750°С, повышая температуру на каждой ступени отжига на 25..50 °С, что способствует более интенсивной реакции вольфрама с алуминатом. Следовательно, дальше повышать температуру данного процесса отжига порошка не является целесообразным.

### 1.2.1 Составы активных веществ

По составу активного вещества различают[20]:

- алюминатные;
- вольфраматные;
- алюмосиликатные;

По способу получения активного вещества, различают[20,21]:

- Прессованные[20,21] - изготавливаются в виде таблеток или керамических трубок путём прессования смеси из порошков активных веществ (оксидов, алюминатов, вольфраматов Ва) и порошков тугоплавких металлов вольфрама или сплавов вольфрама с другими металлами, например с Re.

- Пропитанные[20,21] – вольфрамовую губку погружают в расплав активного вещества эмиссионного материала и пропитывают. Различали следующие составы активных эмиссионных материалов (вольфраматы Ва и Ва - Са, скандаты) и материалы губки (W, Ni, смеси W с Ir, Os). Наиболее распространенными модификациями, часто используемыми на практике, являются катоды с алюминатом Ва – Са с плотностью до 10 А/см<sup>2</sup> при рабочей температуре - 1370 К, срок службы-десятки тысяч часов. Используются в электронно-лучевых трубках, приборах СВЧ-диапазона.

- Боридные[20,21] – за основу приняты соединения типа MBn (М - металл); наибольшее распространение получили составы из гексаборида лантана (LaB6). Данные катоды используются в режиме термополевой эмиссии при высокой напряжённости электрического поля (~10<sup>6</sup> В/см), когда значительная часть эмиссионного тока обусловлена автоэлектронной эмиссией. Этому способствует высокая механическая прочность и устойчивость к электронной и ионной бомбардировкам. Применяются в ускорителях, вакуумных устройствах, работающих в условиях "плохого" вакуума, не отравляясь и обеспечивая электронные токи большой плотности.

В таблице 2 приведены основные параметры применяемых на практике катодов с известным составом (по данным разных авторов).

Таблица 1.2 - Основные типы катодов и их свойства [8,11, 20,21]

Тип ктота	T <sub>раб</sub>	J <sub>0</sub> , А/см <sup>2</sup>	Срок службы, час
<b>Металлический:</b> вольфрамовая проволока диаметром 1 м	2300	0,04	2·10 <sup>5</sup>
	2500	0,3	8300
	2700	1,6	500
	2900	7,3	46

<b>Металлопористый:</b> W – Ba	1000	1	$10^4$
	1100	3	4000
	1180	4 – 6	500 – 2000
С алюминатом Ba – Ca	1370	4 – 10	Десятки тыс.
<b>Оксидный:</b> Ba – Sr – Ca	1000	0,05 – 0,15	$2 \cdot 10^4$
	1100	0,4 – 0,7	3000
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1500 – 1800	до 2	> 1000
<b>Боридный:</b> LaB <sub>6</sub>	1600	0,4	$10^5$
	1800	3,0	5000
	1900	8,5	800
	2000	25	100

### 1.2.2 Способы получения активных веществ

Различают следующие основные способы получения активных веществ:

- классический способ;
- золь – гель технология;
- периодическое осаждение.

Классическим способом является твердофазный синтез, в котором в качестве исходных материалов используют оксиды или гидроксиды алюминия и карбонат бария, карбонат кальция. Однако данная методика имеет существенные недостатки. Продукты, синтезированные таким способом, являются недостаточно чистыми, и обладают гранулометрической неоднородностью.

Золь-гель технология (sol-gel или spin on glass process)[22] основана на способности коллоидного раствора или золи коагулировать, превращаясь в гели. Гели представляют собой структурированные коллоидные системы с жидкой дисперсионной средой.

Золь-гель технология является удобным путем получения дисперсных материалов, позволяет исключить многочисленные стадии промывки. В качестве исходных веществ используют соединения, не вносящие примеси в состав конечного продукта.

При использовании классической нитратной золь-гель технологии[23] используют оксикарбоновые кислоты, как хелатообразующие и полимеризующие агенты, чаще используют лимонную кислоту. Применение лимонной кислоты в качестве комплексообразователя приводит к выпадению осадка нитрата бария при перемешивании в течение 1,5 часов. К этому приводит низкая устойчивость цитратного комплекса бария в сильноокислых средах и низкой растворимостью нитрата бария в воде.

Недостатками данного метода получения активных веществ является необходимость стабилизации комплекса бария с органическими реагентами, а, следовательно, и уменьшение концентрации нитрат – ионов.

Активные вещества получают методом периодического осаждения[24], в котором получают барий – кальциевый вольфрамат путем совместного осаждения вольфраматов и карбонатов бария и кальция из водных растворов с последующим прокаливанием образовавшихся осадков.

Исходными веществами для получения барий – кальциевого вольфрамата являются азотнокислые соли бария и кальция, вольфрамат аммония и карбонат аммония. Осаждают следующие растворы[24]:

Раствор I: Ba (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> –	– 327 г
Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	– 59 г
Дистиллированная вода	– 3000 мл
Раствор II: (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · W <sub>2</sub> O <sub>17</sub> · 2.5 · H <sub>2</sub> O	– 135 г
Дистиллированная вода	– 200 мл
Раствор III: (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O	– 228 г
Дистиллированная вода	– 750 мл

Растворы II и III при осаждении одновременно вливают в раствор I. Предварительно проводят нагрев растворов I и II до температуры порядка 80-90 °С, при этом раствор III имеет температуру порядка 20-30 °С. Необходимо учитывать, что именно при pH=6,5-7,5 достигается наиболее полное осаждение.

Выпавший осадок высушивают, прессуют и прокаливают при 1350-1400 °С в течении 2 часов.

Так как осаждение проводится в периодическом режиме, продукт получается с нестабильными и невоспроизводимыми физико-химическими характеристиками. Известен метод осаждения, применяемый для производства катализаторов и сорбентов, но не применяемый для получения активных веществ – метод непрерывного осаждения из растворов.

Активные вещества в данной работе получали методом непрерывного осаждения[4], в котором растворы азотнокислого алюминия, азотнокислого бария и азотнокислого кальция осаждали в непрерывном режиме при температуре 50 °С, при постоянном значении pH=7,5, в качестве осадителя использовали раствор карбоната натрия.

Метод имеет ряд преимуществ[4]: чистота конечного продукта, воспроизводимость результатов. Полученные вещества в дальнейшем могут быть использованы для синтеза активной фазы для металлопористых термоэлектронных катодов.

Электронно – микроскопические снимки и рентгенограммы барий – кальциевого вольфрамата, свидетельствует о том, что катоды, изготовленные на основе барий – кальциевого вольфрамата, полученного методом осаждения, обладают лучшими эмиссионными свойствами по сравнению с катодами, полученными методом спекания[11].

Как видно из рисунка 1.4, непрерывный процесс в установившемся режиме позволяет полностью обеспечить постоянство всех физико-химических и технологических условий осаждения.

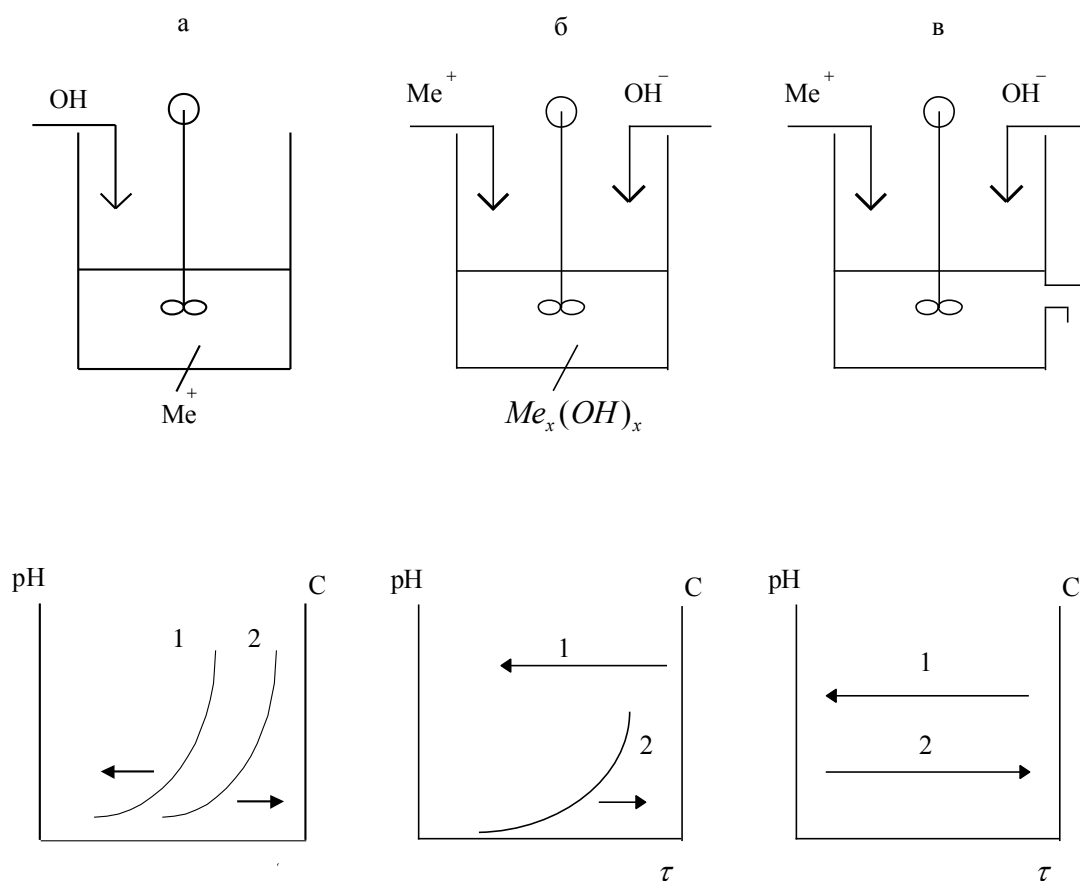


Рисунок 1.4 — Схематическое изображение изменений условий образования осадка при осаждении различными способами [24]

а) -периодический способ; б) -полунепрерывный способ; в) -непрерывный способ; 1 - pH; 2 - концентрация осадка

Из рисунка 1.4 в видно, что в течение всего промежутка времени pH и концентрация осадка остаются постоянными. Это говорит о возможности получения продукта химически однородного состава.

В заключении, можно сделать вывод, что непрерывный метод осаждения имеет большое преимущество перед всеми вышеперечисленными способами получения активных веществ.

### 1.3 Схема экспериментальной установки

Получение алюмината бария проводили на экспериментальной установке, схема которой приведена на рисунке 2.1. Конструкция установки позволяет осуществлять процесс осаждения в периодическом и непрерывном режимах, постоянном или переменном объемах, переменном и постоянном pH, различных температурах.

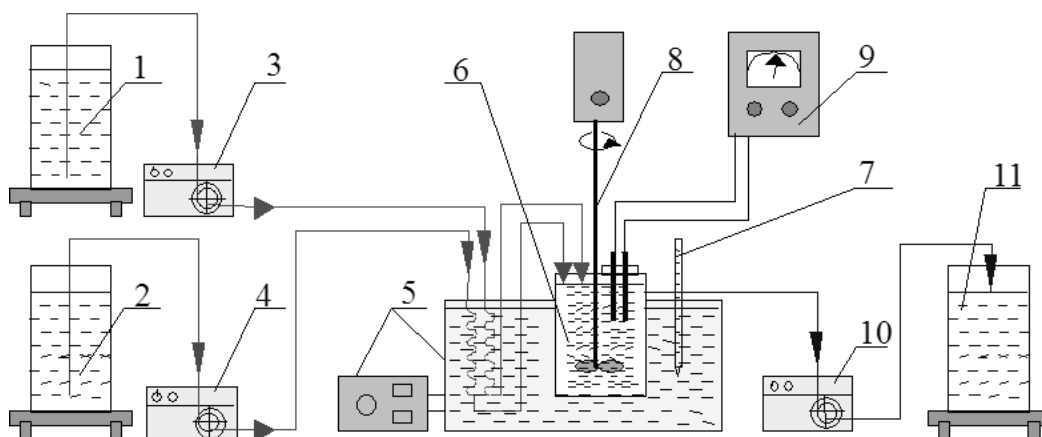


Рисунок 1.5 – Схема экспериментальной установки:

1 – емкость с раствором азотнокислого бария и азотнокислого алюминия, 2 – емкость с раствором карбоната натрия, 3, 4 – перистальтические насосы, 5 – термостат, 6 – реактор, 7 – термометр, 8 – механическая мешалка, 9 – pH-метр, 10 – насос, 11 – накопитель.

Раствор азотнокислого бария и азотнокислого алюминия и раствор карбоната натрия из исходных емкостей 1, 2 перистальтическими насосами 3, 4 подавали через термостат 5 в реактор 6. Температура реакции осаждения поддерживалась термостатом 5 и контролировалась термометром 7. Перемешивание осуществляли при помощи механической мешалки 8. Значение pH определяется pH-метром 9, электроды установлены непосредственно в реакторе. Регулирование и поддержание заданного значения pH проводили изменением скорости подачи раствора карбоната натрия. Образовавшийся осадок при помощи насоса 10 подавали в накопитель 11.

Полученный свежесосажденный осадок промывали дистиллированной водой до отрицательной реакции на анион  $\text{NO}_3^-$  или подвергали его старению, в качестве индикатора использовали раствор дифиниламина, отфильтровывали и просушивали в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре  $110^\circ\text{C}$ .

Часть сухих образцов подвергали термическому анализу в интервале температур  $20 - 1000^\circ$ , а часть их были прокалены при  $1400^\circ\text{C}$  в течении двух часов, далее прокаленные образцы были направлены на рентгенофазовый анализ.

#### 1.4 Результаты и их обсуждение

При выполнении работы были осуществлены осаждения индивидуальных веществ, а также проведен рентгенофазовый и термический анализы полученных образцов.

Параметры экспериментов приведены в сводной таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Сводная таблица условий проведения эксперимента

№ Осаждения	Исходные вещества	Концентрация растворов, г/л	pH-Осаждения	Температура осаждения, $^\circ\text{C}$
1	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	44,98 г на 1 л воды	7	25
2	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	69,34 г на 1 л воды	7	25
3	$\text{Al}_2(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	46,55 г на 1 л воды	7	25

Соответствующие термограммы представлены на рисунке 1.6-1.9.

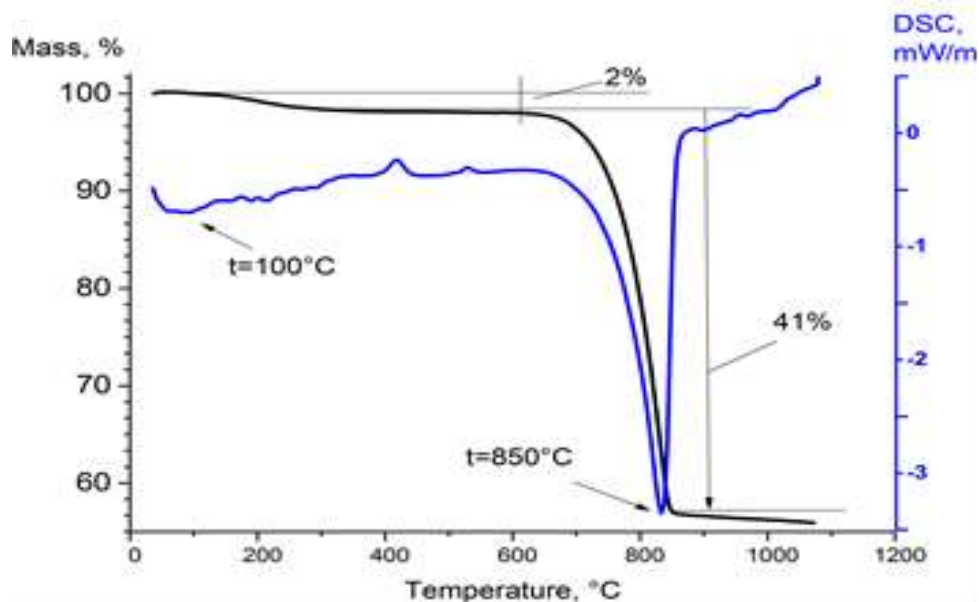


Рисунок 1.6 - Термограммы прекурсора, полученного из азотнокислого кальция  
Термограмма, представленная на рисунке 2.4, соответствует характеру разложения карбоната кальция, которое происходит в одну стадию.



Эндотермический пик на кривой ДТА в интервале температур 800-850°C объясняется разложением исходного вещества до оксида кальция с выделением диоксида углерода по реакции (2.5.1). Общая потеря массы образца составляет 43%.

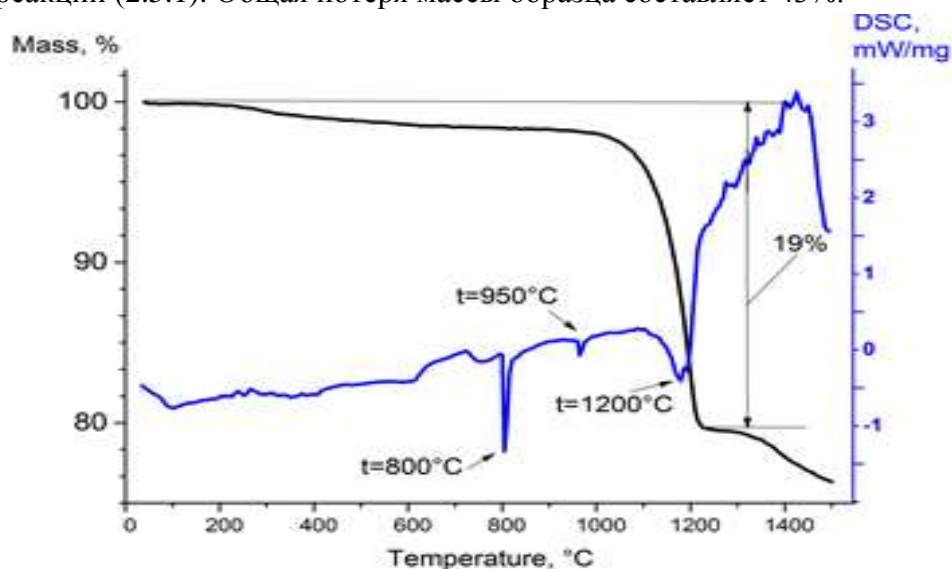


Рисунок 1.7 - Термограмма прекурсора, полученного из азотнокислого бария

На термограмме 2.5, соответствующей картине разложения карбоната бария, наблюдается три характерных эндотермических эффекта. Два эндотермических эффекта с максимумами при 800°C и 950°C соответствуют полиморфным превращениям карбоната бария. В интервале температур 700-850°C согласно [30] происходит переход  $\alpha$ -модификации с ромбической решёткой в  $\beta$ -модификацию с гексагональной решёткой, в интервале 850-1000°C происходит переход  $\beta$ -модификации с гексагональной решёткой в  $\gamma$ -модификацию с кубической решёткой. Данные превращения протекают без потери массы образца. Потеря массы в интервале температур 1100-1200°C составляет 19%, что связано с реакцией (2.5.2) разложения карбоната бария до оксида бария:





На рисунке 2.6 приведена термограмма осадка, полученного при осаждении азотнокислого алюминия. Данная термограмма соответствует характеру термического разложения псевдобемита  $\text{AlOOH}$ . Потеря физически связанной воды происходит в интервале температур 20-150°C, эти потери составляют около 7% от массы навески. При температуре 150-450°C происходит дегидратация, связанная с образованием  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , общая потеря массы составляет 18%. Дальнейшее повышение температуры приводит к незначительной потере массы, происходит фазовый переход  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  в  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Начиная с температуры 450°C, скорость потери массы значительно уменьшается. Дальнейший нагрев до 1100°C приводит к образованию  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . В ходе нагрева образец теряет до 25% массы.

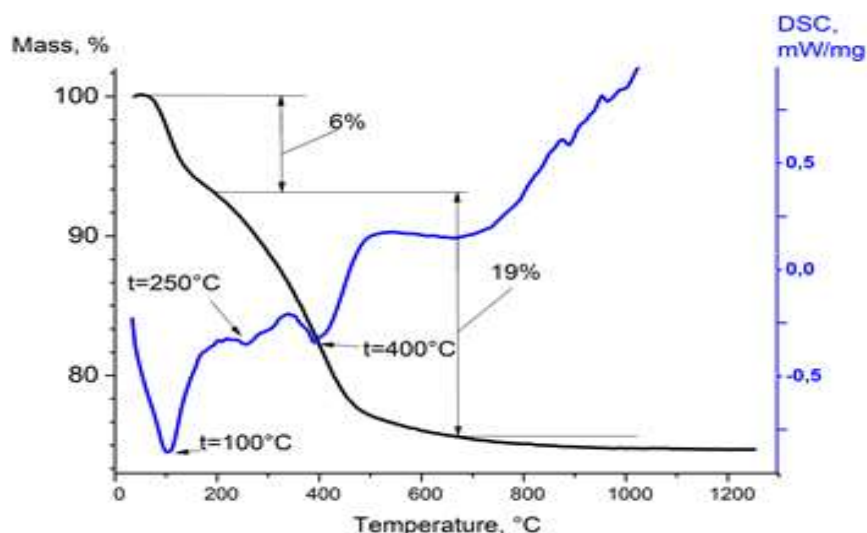


Рисунок 1.8 - Термограммы прекурсоров, полученных из азотнокислого алюминия. Индивидуальные вещества были получены в соответствии с условиями осаждения, приведенными в таблице 2.1, исследованы рентгенофазовым и термическим анализами. Термограммы осажденных веществ соответствуют характеру термического разложения карбоната бария, карбоната кальция и гидроксида алюминия. По данным анализа ТГ и ДСК определены основные стадии деструкции карбоната бария, кальция и гидроксида алюминия (таблица 2.2).

Таблица 1.4 - Результаты термического анализа карбоната бария, кальция и гидроксида алюминия

Образец	Процессы	Темп - ра максимума ДТА, °C	Потеря массы, %	Общая потеря массы, %
Карбонат кальция	Дегидратация карбоната кальция	100	2	43
	Деструкция с выделением диоксида углерода	850	41	
Карбонат бария	Переход $\alpha$ -модификации с ромбической решёткой в $\beta$ -модификацию с гексагональной решёткой	800		19

	Переход $\beta$ -модификации в $\gamma$ -модификацию с кубической решёткой	950		
	Деструкция с выделением диоксида углерода	1200	19	
Гидроксид алюминия	Потеря физически связанной воды	100	7	25
	Дегидратация, связанная с образованием $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$	400	18	
	Переход $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ в $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$	900		

Все полученные образцы исследовались методом рентгенофазового анализа. Например, на рисунке 1.7, 1.8 представлены рентгенограммы высушенного и прокаленного при 850°C осадка, полученного при осаждении азотнокислого кальция.

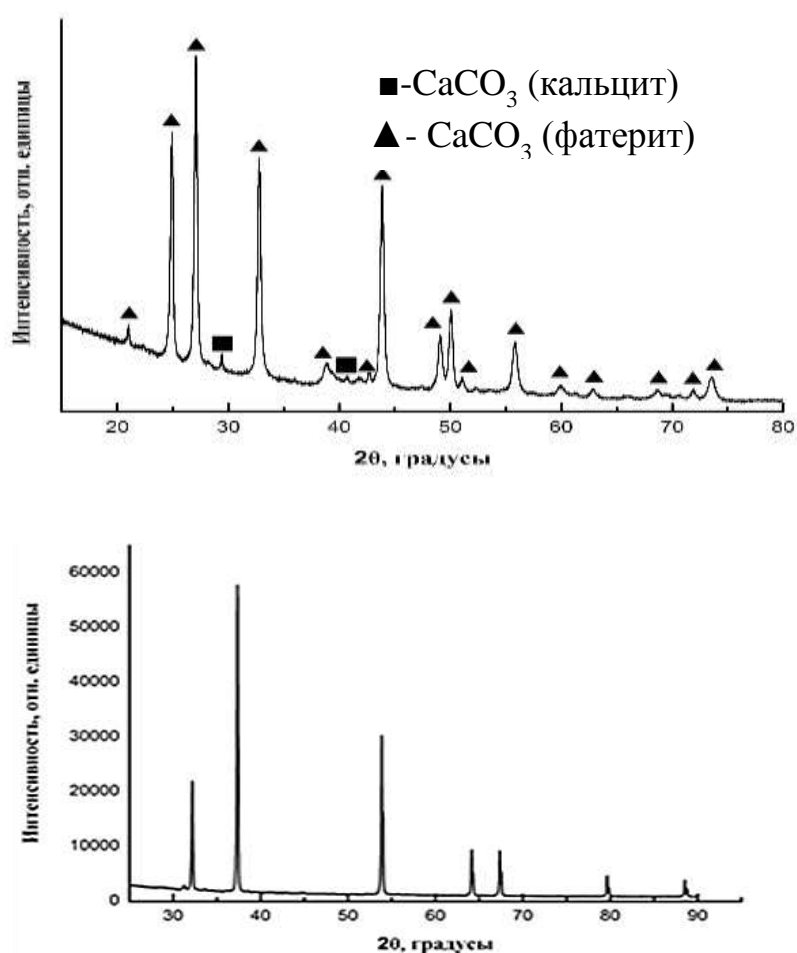


Рисунок 1.9 – Рентгенограмма оксида кальция

Установлено, что просушенный осадок соответствует карбонату кальция, а прокаленный – оксиду кальция, что согласуется с результатами термического анализа.

Обобщенные результаты рентгенофазового анализа представлены в таблице 2.3.

Установлено, что полученные и высушенные осадки не содержат посторонних примесей и представляют собой карбонат бария, карбонат кальция и гидроксид алюминия, что соответствует полученным термограммам.

Таблица 1.5 – Данные рентгенофазового анализа осажденных и термообработанных образцов

Исходный раствор	Идентифицированное вещество после термообработки		Соотношение фаз после термообработки, об. %		Параметры решетки	
	сушка	прокаливание	сушка	прокаливание	сушка	прокаливание
$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	$\text{Ba}(\text{CO})_3$	$\text{BaO}$	100	100	$a=5,29;$ $b=8,92;$ $c=6,43;$	$a=5,53;$
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	$\text{Ca}(\text{CO})_3$ фатерит	$\text{CaO}$	98,6	100	$a=4,13;$ $c=8,47;$	$a=4,81;$
	$\text{Ca}(\text{CO})_3$ кальцит		1,4		$a=4,99;$ $c=17,06;$	
$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	$\text{AlO}(\text{OH})$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	100	100	$a=4,40;$ $b=9,39;$ $c=2,84;$	$a=5,53;$

После прокаливания при температурах 1100°C, 850°C и 1400°C карбонат бария, карбонат кальция и гидроксид алюминия полностью разлагаются до соответствующих оксидов.

## **2 Технологическая схема получения активных веществ для металлопористых катодов**

Технологическая схема представлена на листе графического материала №1.

Модернизация схемы и ее непосредственная адаптация под производственные масштабы – основная цель данной работы. Ниже приведено описание предлагаемой технологической схемы с получением активного вещества и применением промышленного оборудования.

Сырье, поступающее на производственную линию, центробежными насосами подается в реактор осаждения непрерывного действия, в рубашку которого подается вода с температурой  $70^{\circ}\text{C}$  из теплообменника. Теплообменник обогревается Паром «2» ( $2\text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2$ ).

Следующим этапом, сырье из реактора отправляется в сборник, откуда поступает на барабанный вакуум фильтр БОН5– 1,8 – 1У с поверхностью фильтрования  $5\text{ м}^2$ . Далее сырье проходит сушку в полочном шкафу с площадью поверхности загрузки  $4,5\text{ м}^2$  и объемом  $0,63\text{ м}^3$ , где осадок просушивается при  $110^{\circ}\text{C}$ .

Далее, просушенный порошок прокаливают при температурах  $800 - 900^{\circ}\text{C}$  в печи с вращающимися барабанами двухопорные с правым расположением привода с противоточным движением теплоносителя и обрабатываемого вещества.

Полученный прокаленный порошок спекают в таблетки и идет на изготовление катодов.

### 3 Технологический расчет

В данном разделе рассчитаны и подобраны аппараты технологической схемы получения активных веществ.

#### 3.1 Материальный баланс реактора для непрерывной технологии синтеза активных веществ

##### 3.1.1 Определение объемного и массового расходов аппарата

Материальный баланс любого технологического процесса или части его составляется на основании закона сохранения веса (массы) вещества:

$$\Sigma G_{\text{исх}} = \Sigma G_{\text{кон}}$$

Принимаем, что аппарат непрерывного действия и работает в стационарном режиме.

Исходя из лабораторных испытаний, имеем заданный объемный расход аппарата –  $V = 0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Имея плотность раствора  $\rho = 1100 \text{ кг/м}^3$ , переведем объемный расход в массовый:

$$G = V \cdot \rho = 0,1 \cdot 1100 = 110 \text{ кг/ч}$$

Тогда массовый расход раствора примем  $G_{\text{исх}} = G_{\text{кон}} = 1,8 \text{ кг/с}$ .

##### 3.1.2 Расчет рабочего и общего объема реактора

Объем такого реактора непрерывного действия будет определяться единовременной загрузкой реагентов, которая зависит от средней годовой производительности и времени пребывания реагентов в реакторе. Тогда рабочий объем реакционной зоны будет равен:

$$V_{\text{расч.}} = G_{\text{исх}} \cdot \tau / \rho = (1,8 \cdot 10) / 1100 = 0,017 \text{ м}^3$$

Согласно пособию [31] рабочий объем аппарата необходимо принять на 15 – 20% больше, чем расчетный:

$$V_a = V_{\text{расч.}} \cdot 0,15 = 0,25 \text{ м}^3$$

Диаметр реактора можно определить по уравнению:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{m \cdot \pi}};$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{0,025}{1,3 \cdot 3,14}} = 0,394 \text{ м}$$

По [32] выбираем аппарат с номинальным объемом и размерами корпуса аппарата:  $V = 0.040 \text{ м}^3$ ,  $D_H = 0.4 \text{ м}$ ,  $H = 0.345 \text{ м}$ .

Аппарата: тип 4 (аппарат с эллиптическим днищем и плоской объемной крышкой).

### 3.2 Гидродинамический расчет аппарата без внутренних устройств

Расчет производим в соответствии с пособием [31].

Целью гидродинамического расчета является определение усредненных характеристик поля скоростей в объеме аппарата, значений осевой и радиальной сил, действующих на мешалку и мощности перемешивания.

3.2.1. Отношение диаметров аппарата к мешалке:

$$\Gamma D = D / d_m,$$

где  $D$  – диаметр аппарата, м;

$d_m$  – диаметр мешалки, м.

Исходя из технических соображений выбираем лопастную мешалку при  $D/d_m = 1.4 - 4$  [31, с.23]:

По [31] из рекомендаций АТК 24.201.17-90 принимаем параметры мешалки,  $d_m = 0.25 \text{ м}$ ;  $d = 0.025 \text{ м}$ ;  $h = 0.03 \text{ м}$ ;  $b = 0.025 \text{ м}$ ;  $s = 0.004 \text{ м}$ ;

2.2.2. Центробежный критерий Рейнольдса

$$Re_{\text{ц}} = n p d m^2 / \mu = C G a^k S p^l \Gamma d^m \Gamma_D^n,$$

где  $n$  – частота вращения мешалки, 1/с;

$C$  – молярная концентрация, кмоль/м<sup>3</sup>;

$G a$  – критерий Галилея;

$\Gamma d$  – отношение диаметра частиц к мешалки ( $d_{\text{ч}} = 0.3 \text{ мм}$ ), м

$k, l, m, n$  – коэффициенты характеристики типа мешалки (для лопастных –  $k = 0.6$ ;  $l = 0.8$ ;  $m = 0.4$ ;  $n = 1.9$ )

Расчет значения критериев и симплексов подобия:

$$G a = d_{\text{мр}}^3 \cdot c_{\text{г}}^2 / \mu = 0.25^3 \cdot 1100^2 \cdot 9.8 / 1 \cdot 10^{-3} = 0.18 \cdot 10^9$$

$$S_p = \rho_q / \rho_c = 1210 / 1100 = 1.1,$$

$$\Gamma_{dq} = d_q / d_M = 0.3 \cdot 10^{-3} / 0.25 = 1.2 \cdot 10^{-3},$$

$$\Gamma_D = 0.4 / 0.25 = 1.6,$$

$$Re_{\Pi} = 0.5 \cdot 0.18^{0.6} \cdot 10^{5.4} \cdot 1.1^{0.8} \cdot 1.2^{0.4} \cdot 10^{-1.2} \cdot 1.6^{1.9} = 15 \cdot 10^5.$$

$$\text{Тогда } n = 15 \cdot 10^5 (1 \cdot 10^{-3} / 1100 \cdot 0.25^2) = 3.4 \text{ об/с} = 222 \text{ об/мин.}$$

### 3.2.2 Параметр высоты заполнения

$$\gamma = 8 \cdot \frac{H}{D} + p$$

$$\gamma = 8 \cdot \frac{0.345}{0.4} + 1 = 8$$

3.2.3 Параметры распределения скорости  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  связаны между собой зависимостью

$$\psi_2(\psi_1) = \Phi_1 - \Phi_2 \psi_1,$$

Для быстроходных мешалок при  $\Gamma_D \geq 1,5$   $\Phi_1 = 0.5$   $\Phi_2 = 1,25$ .

Параметр распределения скорости  $\psi_1$  можно также определять по графикам  $\psi_1 = f(E)$  при  $\Gamma_D = \text{const}$  [31, с.31].

Принимаем  $\psi_1 = 0.2$ ;

$$\text{Тогда } \psi_2 = 0.5 - 1.25 \cdot 0.2 = 0.25$$

### 3.2.4 Глубина воронки

$$h_B = B \cdot \frac{n^2 \cdot d_M^2}{2g}$$

Параметр глубины воронки:

$$B = -17.2 + \exp(3.33 - 0.2\psi_1),$$

$$B = -17.2 + \exp(3.33 - 0.2 \cdot 0.2) = 9.64,$$

### 3.2.6 Высота установки мешалки над днищем аппарата

$$H_M = 0.7 \cdot d_M = 0.7 \cdot 0.25 = 0.15 \text{ м},$$

### 3.2.7 Мощность, потребляемая при перемешивании лопастной мешалкой

Критерий мощности:

$$K_N = 3.87 \zeta_M K_1(\psi_1),$$

где,

$$K_N = 3.87 \cdot 0.86 \cdot 0.23 = 0.23$$

Из графика  $K_N = f(Re)$  [34, с.558] находим значение критерия мощности перемешивания для лопастной мешалки:  $K_N = 0.5$

$$N = K_N \rho_c n^3 d_M^5;$$

$$N = 0.5 \cdot 1100 \cdot 3.4^3 \cdot 0.25^5 = 220 \text{ Вт} \approx 0.22 \text{ кВт}.$$

Из ближайших нормативных значений [35, с.730] выбираем привод вертикальных перемешивающих устройств, тип III: с концевой опорой вала, мотор-редуктор типа ВО и электродвигателем серий АО2 с  $N = 250$  об/мин, следовательно  $n_{\text{нор}} = 250$  об/мин.

Ближайшее нормативное значение мощности привода типа III:  $N_{\text{нор}} = 1.1 \text{ кВт}$

## 3.3 Материальный баланс кожухотрубчатого теплообменника для нагрева воды в рубашку реактора

Целью расчета материального баланса является определение возможных потерь сырья на стадиях технологического процесса.

Рассчитывается материальный баланс по формуле:

$$G_1 \cdot c_1 \cdot (t_{1н} - t_{1к}) = G_2 \cdot c_2 \cdot (t_{2н} - t_{2к})$$

где  $G_1$  - расход целевого продукта – воды, кг/ч;

$c_1$  – теплоемкость воды, Дж/кг·К;



$t_{1н}$  и  $t_{1к}$  – начальная и конечная температуры воды, °C;

$G_2$  – расход пара кг/ч;

$c_2$  – теплоемкость пара, Дж/кг·K;

$t_{2н}$  и  $t_{2к}$  – начальная и конечная температуры пара, °C.

Из [1] принимаем:

$$G_1 = 300 \text{ кг/ч};$$

$$t_{1н} = 30 \text{ °C};$$

$$t_{1к} = 70 \text{ °C};$$

$$t_{2н} = 120 \text{ °C};$$

$$t_{2к} = 90 \text{ °C}.$$

Из [Павлов Романков] принимаем:

$$c_1 = 4220 \text{ Дж/кг·K};$$

$$c_2 = 2215 \text{ Дж/кг·K}.$$

В данном случае, найдем расход греющего пара.

Из уравнения материального баланса:

$$G_2 = \frac{G_1 \cdot c_1 \cdot (t_{1н} - t_{1к})}{c_2 \cdot (t_{2н} - t_{2к})}$$
$$G_2 = 762,1 \text{ кг/ч}$$

Тепловой баланс кожухотрубчатого теплообменника

### 3.3.1 Определение температурных условий процесса нагревания

Из уравнения теплового баланса имеем:

$$Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_{1н} - t_{1к})$$
$$Q = 139567 \text{ Вт}$$

Среднелогарифмическая разность температур в теплообменнике [1]:

$$\Delta t_{ср} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_м}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_м}}$$

где

$$\Delta t_6 = t_{2н} - t_{1к} = 120 - 30 = 90 \text{ °C}$$

$$\Delta t_м = t_{2к} - t_{1н} = 90 - 70 = 20 \text{ °C}$$

Тогда

$$\Delta t_{ср} = 29 \text{ °C}$$

Для теплоносителя, с меньшим изменением температуры, средняя температура находится как среднеарифметическая температура входа и выхода[1]:

$$t'_{ср} = 0,5 \cdot (t'_{вх} + t'_{вых}) = 0,5 \cdot (120 + 90) = 105 \text{ °C}$$

Для другого теплоносителя вычислим по следующей формуле[1]:

$$t_{cp}'' = t_{cp}' \pm \Delta t_{cp} = 105 + 1,54 = 106,54^{\circ}\text{C}$$

Из [1, стр. 364 – 377] примем коэффициент теплопередачи  $K_{пр} = 950 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{К}$ .

### 3.3.2 Расчет площади теплообмена

Находим ориентировочную площадь теплообмена [1]:

$$F = Q / (\Delta t_{cp} \cdot K_{пр})$$

$$F = 139567 / 29 \cdot 950 = 5,4 \text{ м}^2$$

Для поверхности теплообмена  $F = 5,4 \text{ м}^2$  из стандартного ряда выбираем одноходовой теплообменник со следующими параметрами по [2]:

Число ходов, Z	Внутренний диаметр, D, мм	Общее число труб, N	Поверхность теплообмена, F, м <sup>2</sup>	Длина труб, L, м	Расстояние между перегородками, h, мм
4	325	62	7,5	1,5	180

### 3.4 Расчет обечайки корпуса аппарата

Обечайка – это цилиндрический корпус аппарата, который работает, как правило, под избыточным внутренним или внешним давлением.

Принимаем вид сварного шва и способ сварки:

- стыковой с двусторонним сплошным проваром, выполненный автоматической сваркой;
- длина контролируемых швов от общей длины составляет 100%.

Принимаем коэффициент прочности сварных швов  $\varphi = 1$  [6, с. 407].

Расчетная толщина стенки по формуле 15.4 [6, с. 413]:

$$S_k = \frac{Dp}{2\sigma_d\varphi} + c,$$

где  $c$  – прибавка к расчетной толщине на коррозию;

$D$  – наружный диаметр обечайки, мм;

$p$  – рабочее давление, МПа;

$\sigma_d$  – допускаемое напряжение материала обечайки, МПа;

$\varphi$  – коэффициент прочности сварного шва.

$$P = P_{пара} = 0,2 \text{ МПа}$$

По ГОСТ 52857.1 определим допускаемое напряжение для стали марки 12X18H10T при  $T = 120^{\circ}\text{C}$ :

$$\sigma_d = 174,7 \text{ МПа}.$$

Прибавка на коррозию:

$$c = c_k + c_э;$$

где:

$c_k$  - прибавка на коррозию металла;

$c_э$  - прибавка на эрозию металла.

Показатель глубинной коррозии принимаем по [2, стр. 409]:

$$П = 0,1 \frac{\text{мм}}{\text{год}}$$

Срок службы аппарата : $\tau_a = 10$  лет.

Прибавка на коррозию:  $c_k = П \cdot \tau_a = 0,1 \cdot 10 = 1$  мм

Прибавку на эрозию берем при скорости жидкости  $\omega_{ж} \geq 20$  м/с равным 1:  $c_э = 1$  мм

Прибавка к расчетной толщине:

$$c = c_k + c_э = 1 + 1 = 2 \text{ мм.}$$

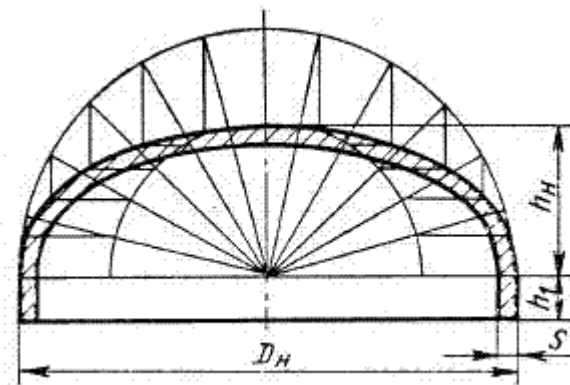
Толщина стенки обечайки с учетом прибавок:

$$S_k = \frac{DP}{2\sigma_\phi \varphi - P} + c = \frac{325 \cdot 0,2}{2 \cdot 174,7 \cdot 1 - 0,2} + 2 = 2,18 \text{ мм.}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки обечайки  $S_k = 4$  мм.

### 3.5 Подбор и расчет толщины крышки и днища

По ГОСТ 6533 – 68 принимаем крышку/днище эллиптическое отбортованное [6, с. 444]:



Днище 325 X 4 – 25 – 12X18H10T

Расчетная толщина стенки эллиптической обечайки по формуле 16.1 [6, стр. 453]:

$$S_p = \frac{P \cdot D_\phi}{2 \cdot \sigma_\phi \cdot \varphi - P}$$

Внутренний радиус кривизны:

$$R_B = \frac{D_B^2}{4 H}$$

Высота не отбортованного днища:

$$h_H = 0.25 \cdot D_B = 0,25 \cdot 325 = 81$$

Внутренний радиус кривизны:

$$R_B = \frac{D_B^2}{4 H} = \frac{325^2}{4 \cdot 81} = 325 \text{ мм}$$

Отбортовку считаем по формуле:

$$h_1 > 0,8 \cdot \sqrt{D_B \cdot (s_K - c)} = 0,8 \cdot \sqrt{325 \cdot (4 - 2)} = 20,4 \text{ мм}$$

По [6, стр. 440] принимаем  $h_1=25\text{мм}$ .

Расчет толщины стенки эллиптической крышки и днища:

$$s_p = \frac{p \cdot D_\phi}{2 \cdot \sigma_d \cdot \phi - p} = \frac{0,2 \cdot 325}{2 \cdot 174,7 \cdot 1 - 0,2} = 0,013 \text{ мм.}$$

Принимаем исполнительную толщину:  $s_{эл} = 4 \text{ мм}$ .

**Условия применения:**

$$0,002 \leq \frac{s_{эл} - c}{D_{BH}} \leq 0,1$$

$$0,002 \leq \frac{4-2}{325} \leq 0,1$$

$$0,002 \leq 0,0062 \leq 0,1$$

Условия применимы.

Выбираем по ГОСТ 6533 – 68 крышку и днище со следующими параметрами:

$D_H$	$h_H$	$h$	$M$
Мм			Кг
325	81	25	4,3

### 3.6 Толщина трубных решеток

По рис. 25.1 [6, стр. 634] выбираем решетку заподлицо под зажим фланцев днища/крышки и корпуса.

$$P = \rho \cdot g \cdot H = 988,7 \cdot 9,81 \cdot 1,5 = 0.014 \text{ МПа}$$

Формула для расчета толщины решетки снаружи [6, стр. 636] :

$$h_1 := k \cdot D \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_{из}}}$$

значение величин  $k$ ,  $D$  и  $p$  в формуле (2.5) для каждого из типов решетки приведены в таблице 25.3 [6, стр. 637]:

$$k = 0,28$$

$$D = D_{\text{вн}} = 0,325 \text{ м}$$

$$p = P_{\text{пара}} = 0,2 \text{ МПа}$$

$\sigma_{\text{изг}} = 140 \text{ МПа}$  – допускаемое напряжение на изгиб для материала решетки - сталь 12Х18Н10Т

Наименьшая высота решетки:

$$h = k \cdot D \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_{\text{изг}}}} = 0,28 \cdot 0,325 \cdot \sqrt{\frac{0,2}{140}} = 0,0035 \text{ м} = 3,5 \text{ мм}$$

Номинальную расчетную высоту решетки посередине рассчитываем по формуле 25.2 [6, стр. 636]:

$$h_{\text{ср}} = k \cdot D \cdot \sqrt{\frac{p}{\varphi \cdot \sigma_{\text{изг}}}}$$

Значение  $k$  берем из таблицы 25.3:

$$k = 0,47$$

$\varphi$  – коэффициент ослабления решетки отверстиями, определяется по формуле 23.5 [6, стр. 636]:

$$\varphi = \frac{D_{\text{вн}} - \Sigma d_{\text{нар}}}{D_{\text{вн}}}$$

где  $\Sigma \cdot d_{\text{нар}}$  - сумма диаметров отверстий в решетке на диаметре  $D_{\text{вн}}$ .

$$\Sigma = 10$$

Коэффициент ослабления:

$$\varphi = \frac{D_{\text{вн}} - \Sigma d_{\text{нар}}}{D_{\text{вн}}} = \frac{0,325 - 10 \cdot 0,025}{0,325} = 0,23$$

Номинальная расчетная высота решетки посередине:

$$h_{\text{ср}} = k \cdot D \cdot \sqrt{\frac{p}{\varphi \cdot \sigma_{\text{изг}}}} = h = 0,47 \cdot 0,325 \cdot \sqrt{\frac{0,014}{0,23 \cdot 140}} = 0,012 \text{ м} = 12 \text{ мм}$$

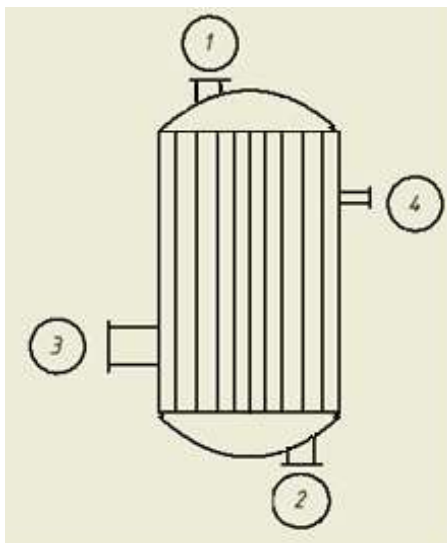
С учетом прибавки на коррозию с обеих сторон на 2 мм рассчитаем общую толщину трубной решетки:

$$h_{\text{т.р.}} = h_1 + h_{\text{т.р.}} + 2 = 2 + 12 + 2 = 16 \text{ мм}$$

По ГОСТ 3 55601- 2013 толщину решетки принимаем по табл. 5 равной:

$$S_{\text{т.р.}} = 19 \text{ мм}$$

### 3.7 Расчет и подбор патрубков и фланцев



Расчет патрубков сводится к определению диаметра патрубка из уравнения объемного расхода:

$$V = \omega \cdot S$$

Площадь поперечного сечения:

$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$  выражаем диаметр и подставляем в уравнение объемного расхода:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot \omega}}$$

Уравнение объемного расхода можно рассчитать через массовый расход

$$V = \frac{G}{\rho}$$

Подставляем :

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot \omega}}, \text{ где}$$

$G$  - массовый расход соответствующего потока теплоносителя, кг/с;

$\omega$  - скорость; для жидкости принимаем 1 – 2 м/с, для пара 10 – 30 м/с;

$\rho$  – плотность жидкости или пара, кг/м<sup>3</sup>.

- Расчет 1 и 2 патрубков:

Внутри труб протекает вода, поэтому скорость воды принимаем:  $\omega_B = 1$  м/с;

Плотность воды при средней температуре 30°C :  $\rho_B = 988$  кг/м<sup>3</sup>

Диаметр первого и второго патрубков равен:

$$d_{1,2} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_B}{\pi \cdot \rho_B \cdot \omega_B}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 300/3600}{\pi \cdot 0,988 \cdot 1}} = 0,033 \text{ м}$$

По ГОСТ 10704 – 91 принимаем диаметр патрубка Ø35 мм:

$$d_{1,2} = 35 \text{ мм}$$

Толщина патрубка:  $S_{1,2} = 1$  мм

Внутренний диаметр:  $d_{вн 1,2} = 35 - 2 \cdot 1 = 33 \text{ мм}$

- Расчет 3 патрубка:

Третий патрубок для подачи пара в теплообменник:

Скорость пара примем равной:  $\omega_{\text{п}} = 30 \text{ м/с}$ ;

Плотность пара при средней температуре 120°C равна

$$\rho_{\text{п}} = 1,12 \text{ кг/м}^3$$

Диаметр 3 патрубка:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{п}}}{\pi \cdot \rho_{\text{п}} \cdot \omega_{\text{п}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 762,1/3600}{\pi \cdot 30 \cdot 1,12}} = 0,09 \text{ м}$$

По ГОСТ 10704 – 91 принимаем Ø 90 мм

Толщина патрубка:  $S_3 = 2 \text{ мм}$

Внутренний диаметр:  $d_{\text{вн}3} = 86 \text{ мм}$

- Расчет 4 патрубка:

$$d_4 = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{п}}}{\pi \cdot \rho_{\text{кп}} \cdot \omega_{\text{кп}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 726,1/3600}{\pi \cdot 942,9 \cdot 2}} = 0,0369 \text{ м} = 37 \text{ мм}$$

По ГОСТ 10704 – 91 принимаем патрубок Ø38 мм

$$d_4 = 38 \text{ мм}$$

Толщина патрубка:  $S_4 = 2 \text{ мм}$

Внутренний диаметр:  $d_{\text{вн}4} = 34 \text{ мм}$

Подбор фланцев:

Выберем фланцы для соединения крышки/днища с корпусом.

По ГОСТ 1280-80 примем все фланцы – тип 1.

По таблице 21.12 [6, стр.554] необходимые значения величин:

D <sub>y</sub>	d <sub>н</sub>	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	h	Болты		Тип фланцев – 1	
						d <sub>б</sub>	z	ГОСТ 1255-67	
	ММ								b, мм
300	325	435	395	370	4	M20	12	18	9,33

Фланцы на 1 и 2 патрубки:

D <sub>y</sub>	d <sub>н</sub>	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	h	Болты		Тип фланцев – 1		
						d <sub>б</sub>	z	ГОСТ 1255-67		
	ММ							b, мм	Масса, кг	
35	38	120	90	70	2	M12	4		10	0,79

Фланцы на 3 патрубок:

D <sub>y</sub>	d <sub>н</sub>	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	h	Болты		Тип фланцев – 1	
						d <sub>б</sub>	z	ГОСТ 1255-67	
	ММ							b, мм	Масса, кг
90	90	185	150	128	3	M16	4		

Фланец на 4 патрубок:

D <sub>y</sub>	d <sub>н</sub>	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	h	Болты		Тип фланцев – 1	
						d <sub>б</sub>	z	ГОСТ 1255-67	
								b, мм	Масса, кг
38	38	120	90	70	2	M12	4	10	0,79

### 3.8 Расчет опорных лап

Лапы для вертикальных цилиндрических аппаратов примем – тип II по ОН 26-01-69-68 таблица 29.2 [6, стр.673]:

Рассчитаем массу аппарата:

Масса обечайки:

$$m_{об} = 0,785(D_{нар}^2 - D_{вн}^2)H_{об}\rho$$

где:  $D_{н} = 0,325$  м – наружный диаметр;

$D_{вн} = 0,317$  м – внутренний диаметр;

$H_{об} = 1,5$  м – высота обечайки;

$\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup> – плотность стали.

$$m_{об} = 0,785 \cdot (0,325^2 - 0,317^2) \cdot 1,5 \cdot 7800 = 47,1 \text{ кг.}$$

Масса трубок:

$$m_{тр} = 0,785 \cdot (d_{нар}^2 - d_{вн}^2) \cdot L \cdot N_{тр} \cdot \rho$$

$$m_{тр} = 0,785 \cdot (0,025^2 - 0,021^2) \cdot 1,5 \cdot 62 \cdot 7800 = 104,8 \text{ кг}$$

Масса крышки и днища:

$$m_{кр} = m_{дн} = 4,3 \cdot 2 = 8,6 \text{ кг}$$

Масса трубных решеток:

$$m_{тр.р.} = 2 \cdot 0,785(D_{н}^2 - d_{нар}^2 \cdot N_{тр}) \cdot S_{тр.реш.} \cdot \rho$$

$$m_{тр.р.} = 2 \cdot 0,785 \cdot (0,435^2 - 0,025^2 \cdot 62) \cdot 0,019 \cdot 7800 = 35 \text{ кг.}$$

Масса аппарата:



$$m_{\text{ап}} = m_{\text{об}} + m_{\text{тр}} + m_{\text{тр.р.}} + m_{\text{кр}} = 47,1 + 104,8 + 8,6 + 35 = 195,5 \text{ кг.}$$

Принимаем, что масса вспомогательных устройств (штуцеров, фланцев, болтов и т.д.) составляет 20% от основной массы аппарата, тогда:

$$m_{\text{ап}} = 234,6 \text{ кг}$$

Рассчитаем массу воды в аппарате:

$$M_{\text{воды}} = V_{\text{ап}} \cdot \rho_{\text{в}},$$

Плотность воды  $\rho_{\text{в}}$  принимаем  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

Объем аппарата:

$$V_{\text{ап}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2}{4} \cdot L = \frac{3,14 \cdot 0,325^2}{4} \cdot 1,5 = 0,124 \text{ м}^3$$

С учетом крышки и днища:

$V_{\text{эл}} = 0,006 \text{ м}^3$  – объем эллиптической крышки по табл.16.1[6, стр.440]:

$$V_{\text{ап.общ.}} = V_{\text{ап}} + 2V_{\text{эл}} = 0,124 + 2 \cdot 0,006 = 0,136 \text{ м}^3$$

Масса воды в аппарате:

$$M_{\text{воды}} = 0,136 \cdot 988 = 134,4 \text{ кг}$$

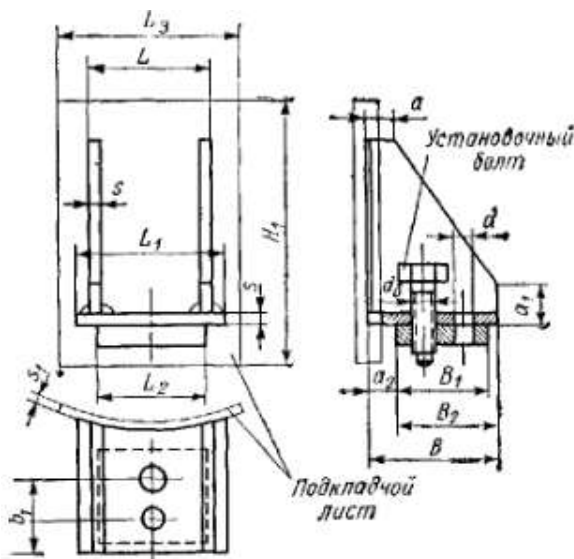
Рассчитаем общую нагрузку на опоры  $G_{\text{общ.}}$ :

$$G_{\text{общ.}} = (M + M_{\text{воды}}) \cdot g = (195,5 + 134,4) \cdot 9,8 = 3233 \text{ Н}$$

Установим на корпус аппарата 3 опоры. Рассчитываем нагрузку на одну опору:

$$\frac{G_{\text{общ.}}}{3} = \frac{3233}{3} = 1078 \text{ Н} = 0,0011 \text{ МН}$$

Из табл. 29.2 принимаем опорные лапы на нагрузку  $P=0,004\text{МН}$  [6, с.673]. Опоры II типа.



Р МН	L	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	B	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	b	b <sub>1</sub>	H	h	s	a	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	R	d	d <sub>6</sub>	масса	Подкладной лист		
	мм																	кг	s <sub>1</sub>	L <sub>3</sub>	H <sub>1</sub>
																			мм		
0,0016	50	60	40	60	45	50	15	40	85	6	4	10	15	10	8	12	M10	0,5	6	75	120

### 3.9 Материальный баланс процесса фильтрования суспензии

В данном разделе рассчитана объемная производительность фаз суспензии, также посчитана объемная и массовая производительность промывной воды.

Рассчитаем влажность осадка[3]:

$$\omega_{oc} = \varepsilon \cdot \rho_{\phi} / [\varepsilon \cdot \rho_{\phi} + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_T]$$

Из лабораторных данных имеем:

$\rho_{\phi} = 978$  – плотность фильтрата,

$\rho_T = 2051$  – плотность твердой фазы,

$$\omega_{oc} = 0,37 \cdot 978 / [0,37 \cdot 978 + 0,63 \cdot 2051] = 0,22$$

Рассчитаем плотность фаз:

для суспензии  $\rho_c = 1 / [\chi_c / \rho_T + (1 - \chi_c) / \rho_{\phi}] = 1 / [0,18 / 2051 + 0,82 / 978] = 1080 \text{ кг/м}^3$

для влажного осадка

$$\rho_{oc} = 1 / [\chi_{oc} / \rho_T + (1 - \chi_{oc}) / \rho_{\phi}] = 1 / [0,84 / 2051 + 0,16 / 978] = 1745 \text{ кг/м}^3$$

Количество твердой фазы:

$$G_T = G_{oc} \cdot \chi_{oc} = 0,3 \cdot 0,84 = 0,252 \text{ кг/с}$$

где  $G_{oc}$  – расход осадка, кг/с.

Определим расход суспензии:

$$G_c = G_T / \chi_c = 0,252 / 0,18 = 1,4 \text{ кг/с}$$

Количество фильтрата:

$$G_{\phi} = G_c - G_{oc} = 1,4 - 0,3 = 1,1 \text{ кг/с}$$

Количество твердого вещества в суспензии:

$$G_T = G_c \cdot \chi_c = 5 \cdot 10^3 \cdot 0,18/3600 = 0,25 \text{ кг/с}$$

Количество воды в суспензии:

$$G_{H_2O}^c = G_c - G_T = 1,4 - 0,252 = 1,15 \text{ кг/с}$$

Количество воды в осадке:

$$G_{H_2O}^{oc} = G_{oc} - G_T = 0,3 - 0,252 = 0,05 \text{ кг/с}$$

Объемная производительность по фазам:

$$\text{для суспензии } V_c = G_c / \rho_c = 1,4 / 1084 = 0,0013 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\text{для фильтрата } V_\phi = G_\phi / \rho_\phi = 1,1 / 978 = 0,0011 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\text{для влажного осадка } V_{oc} = G_{oc} / \rho_{oc} = 0,3 / 1745 = 0,00017 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\text{для твердой фазы } V_T = G_T / \rho_T = 0,25 / 2051 = 0,00012 \text{ м}^3/\text{с}$$

Определяем объемный и массовый расход промывной воды:

$$V_{пр} = L \cdot V_{oc} = 0,25 \cdot 0,00017 = 0,00021 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$G_{пр} = V_{пр} \cdot \rho_{H_2O} = 0,00021 \cdot 984 = 0,207 \text{ кг/с}$$

### 3.10.1 Расчет поверхности фильтрования

Рассчитаем поверхность фильтрования и выберем фильтрующий аппарат.

Примем толщину осадка из [3]:  $h_{oc} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Соотношение объемов осадка и фильтрата:

$$U = V_{oc} / V_\phi = 0,00017 / 0,0011 = 0,15 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Удельная производительность фильтрата:

$$q = h_{oc} / U = 10 \cdot 10^{-3} / 0,15 = 0,067 \text{ м}^3 / \text{м}^2$$

Продолжительность фильтрования при  $\Delta P = \text{const}$ :

$$\begin{aligned} \tau &= q^2 \cdot U \cdot \mu_\phi \cdot \frac{r_{oc}}{2\Delta P} + q \cdot \mu_\phi \cdot \frac{R_{\phiп}}{\Delta P} \\ &= 0,067^2 \cdot 0,15 \cdot 0,375 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{9,1 \cdot 10^{13}}{2 \cdot 0,069 \cdot 10^6} + 0,067 \cdot 0,375 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{7 \cdot 10^9}{0,069 \cdot 10^6} \\ &\tau = 167 \text{ с.} \end{aligned}$$

Продолжительность промывки осадка:

$$\tau_{\text{pr}} = 81\text{c}.$$

$$T = (\tau + \tau_{\text{np}})/0,9 = (167 + 81)/0,9 = 276 \text{ с.}$$
$$F = V_{\phi} \cdot T/q = 0,0011 \cdot 276/0,067 = 4,5 \text{ m}^2$$

Рисунок 3.1 – конструкция барабанного вакуум фильтра БОН5– 1,8 – 1У[4]

## 44

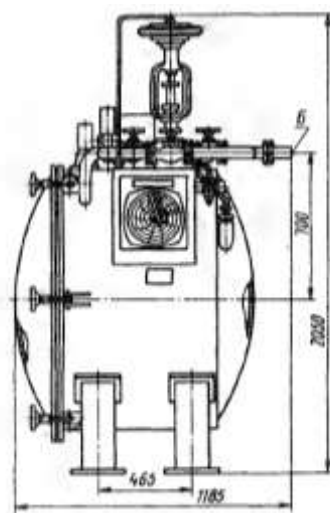


Рисунок 3.2 – конструкция полочной вакуум сушилки ПВ4,5 – 0,63НУ – 01[4]

### 3.11 Выбор печи для прокаливания активного вещества

По технологии получения активных веществ, процесс прокаливания протекает при температурах 800 – 900°C, следовательно, из [4] выбираем печь с вращающимися барабанами двухпорные с правым расположением привода с противоточным движением теплоносителя и обрабатываемого вещества.

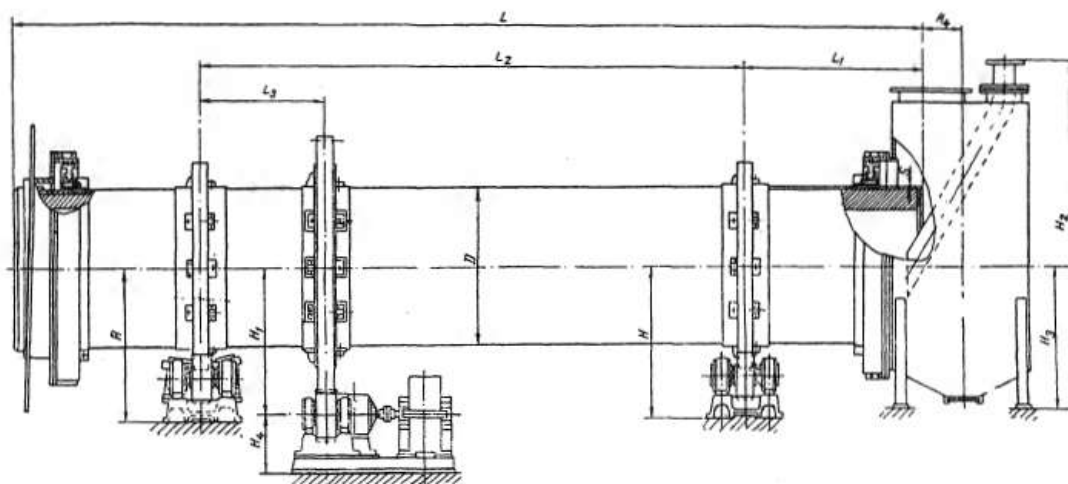


Рисунок 3.3 – печь противоточная с правым расположением привода

### 3.12 Выбор конструкционных материалов

При конструировании химической аппаратуры конструкционные материалы должны отвечать следующим основным требованиям:

Достаточная общая химическая и коррозионная стойкость материала в агрессивной среде с заданными параметрами по концентрации среды, ее температуре и

давлению, при которых осуществляется технологический процесс, а также стойкость против других возможных видов коррозионного разрушения.

Достаточная механическая прочность для заданного давления и температуры технологического процесса с учетом специфических требований, предъявляемых при испытании аппаратов на прочность, герметичность и т.д., и в эксплуатационных условиях при действии на аппараты различного рода дополнительных нагрузок (ветровая нагрузка, прогиб от собственного веса и т.д.).

Наилучшая способность материала свариваться, обеспечивая высокие механические свойства сварных соединений и коррозионную стойкость их в агрессивной среде, обрабатываться резанием, давлением, подвергаться сгибу и т.п.

Низкая стоимость материала, не дефицитность и возможность получения без освоения промышленностью.

Проанализировав литературные источники и рекомендации, можно сделать следующие выводы:

- в соответствии с рекомендациями [31, 35] элементы реактора, имеющие непосредственный контакт со средой, выполнять из конструкционной стали 16ГС. При заданных технологических данных, сталь является достаточно надежной;
- для теплообменной рубашки, по рекомендации [31, 35] исполнительной назначить сталь 15ХМ, так как температурный диапазон соответствует заданным условиям технологического процесса;
- для крепёжных деталей (болтов, гаек, шайб) в соответствии с пособием [24, 29] выбрана сталь Ст3. Крепёжные элементы реактора не контактируют со средой аппарата, что облегчает условия эксплуатации стали; для изготовления прокладок по рекомендации [35] предлагается использовать паронит. Данный материал легко штампуются, не деформируется даже при достаточно долгом хранении, противостоит действию грибков и бактерий.

Исходя из того, что в теплообменнике происходит теплообмен между насыщенным водяным паром и водой, материал следует выбирать так, чтобы он был устойчив к данной среде. Из справочника [4, с. 231] выбираем сталь 12Х18Н10Т. Из этой стали будут изготовлены корпус аппарата и его трубные решетки.

## 4 Механический расчет

### Механический расчёт реактора для непрерывной технологии синтеза активных веществ

Главной целью механического расчёта реактора является определение конструктивных размеров различных элементов аппарата. Проводится проверка их надёжности в рабочих условиях, а так же в условиях испытаний. Данные критерии разнятся от элемента к элементу, а потому будут предварительно оговариваться в каждом подпункте настоящего раздела.

#### 4.1 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр обечайки, мм,  $D = 400$ ;
- внутреннее рабочее давление, МПа,  $p_{\text{раб}} = 0,1$ ;
- плотность смеси в реакторе,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\rho = 1100$ ;
- высота заполнения реактора, м,  $H_{\text{зап}} = 0,296$ ;
- допускаемое напряжение стали для рабочих условий, МПа,  $\sigma_d = 184$ ;
- допускаемое напряжение стали для условий гидравлических испытаний,

МПа,  $\sigma_{d,20} = 272,5$ .

Цель данного расчёта заключается в том, чтобы найти толщины стенки цилиндрической обечайки, при которой будет обеспечена прочность конструкции.

Критерием надёжности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$p \leq p_d$$

где  $p$  – расчётное значение наружного давления при рабочих условиях, МПа;  $p_d$  – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [36,37].

Критерием надёжности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{\text{и}} \leq p_{d, \text{и}}$$

где  $p_{\text{и}}$  – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа;  $p_{d, \text{и}}$  – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [36].

##### 4.1.1 Расчётное давление при рабочих условиях

$$P_p := P_a + \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{зап}}}{10^9}$$

где  $\rho$  – плотность смеси в реакторе,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$  [38].

Тогда:

$$P_p = 0.104 \text{ МПа}$$

4.1.2 Пробное давление для гидравлических испытаний аппарата [38]

$$P_{\text{и}} := 1.25 \cdot P_a \cdot \frac{\sigma_{\text{д}20}}{\sigma_{\text{д}}}$$

где  $P_a$  – расчетное давление при рабочих условиях, МПа;  $\sigma_{\text{д}}$  – допускаемое напряжение материала аппарата при рабочих условиях, МПа;  $\sigma_{\text{д}20}$  – допускаемое напряжение материала аппарата при условиях гидравлического испытания, МПа.

Тогда:

$$P_{\text{и}} = 0.133 \text{ МПа}$$

4.1.3 Расчётная толщина цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [36]

$$S_p := \max \left( \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_{\text{д}} - P_a}, \frac{P_{\text{и}} \cdot D}{2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_{\text{и}} - P_{\text{и}}} \right)$$

где  $D$  – внутренний диаметр аппарата, мм;  $P_a$  – расчётное давление, МПа;  $P_{\text{и}}$  – пробное давление при гидравлическом испытании, МПа;  $\sigma_{\text{д}}$  – допускаемое напряжение материала аппарата при рабочих условиях, МПа;  $\sigma_{\text{и}}$  – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания,  $\phi$  – коэффициент прочности сварного шва, принимаемый для цилиндрической обечайки рубашки равным 1 [36, 38].

Тогда:

$$S_p = 0.126 \text{ мм}$$

4.1.4 Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки

$$s \geq s_p + c$$

где  $c$  – прибавка на различные виды разрушений, мм [36].

Тогда:

$$S_1 \geq 0.126 + 2 \text{ мм}$$

Примем исполнительную толщину из стандартного ряда значений, а именно 4 мм.

4.1.5 Допускаемое давление для рабочих условий [36]

$$P_{\text{д}} = \frac{[2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \phi \cdot (s - c)]}{D + (s - c)} \quad (5.7)$$

Тогда:

$$P_{\text{д}} = \frac{2 \cdot 155 \cdot (8 - 2)}{1800 + (8 - 2)} = 1.03 \text{ МПа}$$



4.1.6 Допускаемое давление для условий испытания [36]:

$$p_{д.и} := \frac{[2 \cdot \sigma_d \cdot \phi_p \cdot [(S_1) - c]]}{D + [(S_1) - c]} = 0.826$$

4.1.7 Проверим надёжность конструкции для рабочих условий

$$P_p = 0.104 < p_{д.и} = 0.826$$

Следовательно, критерий устойчивости соответствует допускаемым значениям, а надёжность цилиндрической обечайки для рабочих условий выполнена.

4.1.8 Проверим надёжность конструкции для условий гидравлического испытания:

$$P_{и} = 0.133 < p_{д.и} = 0.826$$

Таким образом, можно сделать вывод, что критерий устойчивости соответствует допускаемым значениям, а надёжность цилиндрической обечайки для условий испытаний обеспечена.

4.1.9 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [36]:

$$\frac{S_k}{D} = (c) \\ = 0,005 \leq 0,1$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины обечайки выполняются.

Так как условия надёжности выполняются, то можно сделать вывод о возможности применения данной толщины обечайки.

## 4.2 Расчёт толщины стенки эллиптического днища

Исходные данные:

- внутренний радиус днища, мм,  $R_{кр} = 400$ ;
- внутренняя высота выпуклой части днища, мм,  $H = 100$ ;
- высота отбортовки днища или крышки, мм,  $h_0 = 40$ ;
- внутреннее расчётное давление, МПа,  $p = 0,1$ ;
- пробное давление при гидравлическом испытании, МПа,  $p_{и} = 0,103$ ;
- допускаемое напряжение стали для рабочих условий, МПа,  $\sigma_d = 184$ ;
- допускаемое напряжение стали для условий гидравлических испытаний,

МПа,  $\sigma_{д.20} = 218$ .

Целью выполнения расчёта является подбор такой толщины стенки эллиптических днища и крышки, чтобы была обеспечена прочность данных конструкций. Критерием надёжности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$p \leq p_{д.1} \quad (5.10)$$

где  $p$  – расчётное значение наружного давления при рабочих условиях, МПа;  $p_{д1}$  – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [1, 2].

Критерием надёжности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{и} \leq p_{д1.и} \quad (5.11)$$

где  $p_{и}$  – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа;  $p_{д1.и}$  – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [1].

4.2.1 Расчётная толщина эллиптического днища, нагруженного внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [36]:

$$s_{1.p} = \max \left( \frac{p \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_d - 0.5 \cdot p}, \frac{p_{и} \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_d \cdot 20 - 0.5 \cdot p_{и}} \right)$$

Тогда:

$$S_{1p} = 0.757 \text{ мм}$$

4.2.2 Исполнительная толщина стенки эллиптического днища:

$$s_1 \geq s_{1.p} + c$$

где  $c$  – прибавка на различные виды разрушений, мм [36].

Тогда:

$$S_p = 3 \text{ мм}$$

Примем исполнительную толщину из стандартного ряда значений, а именно 4 мм.

4.2.3 Допускаемое давление для рабочих условий [36]:

$$p_{д.1} = \frac{2(s_1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_d}{R + 0.5(s_1 - c)}$$

Тогда:

$$P_{д1} = 0.827 \text{ МПа}$$

5.2.1 Проверим надёжность конструкции для рабочих условий:

$$p_{и} = 0,103 \leq P_{д1} = 0.827$$

Следовательно, критерий устойчивости соответствует допускаемым значениям и надёжность эллиптических днища и крышки для рабочих условий обеспечена.

4.2.2 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [3]:

$$\left( \frac{S_{p.y} - c}{D} \right) = 0,0025 \leq 0,1$$

$$H_1$$

$$0,2 \leq D = 0,225 \leq 0,5$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины днища и крышки выполняются.

По полученным расчетам можно сделать вывод, что исполнительная толщина стенки днища равная 4 мм обеспечивает надежность конструкции.

### 4.3 Расчет плоской крышки

Исходные данные для расчёта:

- Диаметр обечайки аппарата, мм,  $D = 400$ ;
- внутреннее расчётное давление, МПа,  $p = 0,1$ ;
- плотность среды,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\rho = 1100$ ;
- пробное давление при гидравлическом испытании, МПа,  $p_{\text{и}} = 0,103$ ;
- допускаемое напряжение стали для рабочих условий, МПа,  $\sigma_{\text{д}} = 184$ ;

Целью расчёта плоского является подбор исполнительной толщины плоской крышки, чтобы была обеспечена прочность данных конструкций. Критерием надёжности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$P_p < P_{\text{д}}$$

Для определения расчетного давления определим гидравлическое давление

$$P_{\text{Г}} := \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{зап}}}{10^9}$$

$$P_{\text{Г}} = 3.91 \times 10^{-3} \text{ МПа}$$

Тогда расчетное давление

$$P_{\text{р}} := P_{\text{а}} + P_{\text{Г}}$$

$$P_{\text{р}} = 0.104 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для рабочего состояния:

$\eta := 1$  коэффициент, учитывающий вид заготовки (для листового проката)

Допускаемое напряжение для стали 16 ГС при  $^{\circ}\text{C} t_{\text{р}} = 70$

$$\sigma = 184 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 16ГС при  $t = 20^{\circ}\text{C}$ :

$$\sigma_{20} := 184 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{д20} := \eta \cdot \sigma_{20}$$

$$\sigma_{д20} = 184 \text{ МПа}$$

Пробное давление для не литых аппаратов

$$P_{пр} := 1.25 \cdot P_a \cdot \frac{\sigma}{\sigma_{д20}}$$

$$P_{пр} = 0.125$$

Допускаемое напряжение при гидравлических испытаниях:

$$\sigma_{Т70} := 441.8 \text{ МПа}$$

минимальный предел текучести для 16ГС при  $t = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\sigma_{мин} := \frac{\sigma_{Т70}}{1.1}$$

$$\sigma_{и} = 401.636 \text{ МПа}$$

Определим расчетную толщину стенки крышки:

Выбираем схему закрепления крышки 11

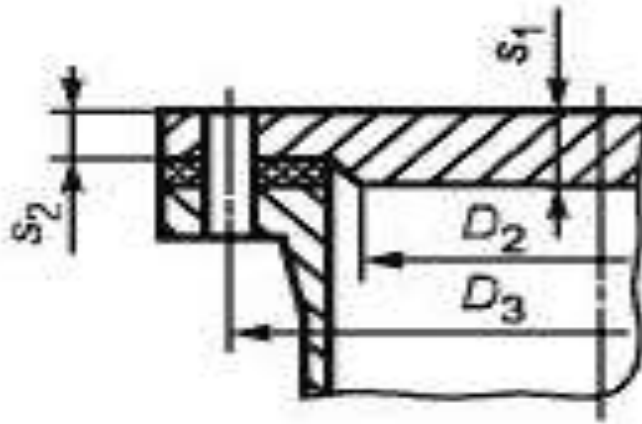


Рисунок 4.1 - схема закрепления крышки

$$D_3 := 495_{\text{мм}}$$

$$D_{пр} := D_3$$

$$K := 0.4$$

K - коэффициент, учитывающий тип закрепления крышки

$$d_1 := 15_{\text{мм}}$$

$$d_2 := 15_{\text{мм}}$$

$$d_3 := 40_{\text{мм}}$$

$$D_6 := 495_{\text{мм}}$$

$$K_o := \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{d_1}{D_6}\right)^3 - \left(\frac{d_2}{D_6}\right)^3 - \left(\frac{d_3}{D_6}\right)^3}{1 - \frac{d_1}{D_6} - \frac{d_2}{D_6} - \frac{d_3}{D_6}}}$$

$$K_o = 1.079$$

$K_o$  - коэффициент ослабления, определяют для наиболее ослабленного сечения

Расчетную толщину стенки определяем по формуле:

$$S_p := \max \left( K \cdot K_o \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P_p}{\phi_p \cdot \sigma}}, K \cdot K_o \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P_p}{\phi_p \cdot \sigma_{\text{и}}}} \right)$$

$$S_p = 5.351$$

Исполнительная толщина крышки с учетом прибавок к расчетной толщине:

$$S_{\text{и}} := S_p + c$$

$$S_{\text{и}} = 7.351$$

Исполнительную толщину стенки примем

$$S_{\text{кр}} := 12_{\text{мм}}$$

Используемые при расчете формулы применимы при условии:

$$\frac{S_{\text{кр}} - c}{D_p} \leq 0.1$$

$$\frac{S_{\text{кр}} - c}{D_p} = 0.012 \leq 0.1$$

расчет верный.

Условие прочности по допускаемым давлениям

$$P_d := \left( \frac{S_{\text{кр}} - c}{K \cdot K_o \cdot D_p} \right)^2 \cdot \sigma \cdot \phi_p$$

$$P_d = 0.131 \text{ МПа}$$

$$P_p = 0,1 < P_d = 0,131$$

Условие прочности при гидравлических испытаниях

$$P_{ди} := \left( \frac{S_{кр} - c}{K \cdot K_o \cdot D_p} \right)^2 \cdot \sigma_{и} \cdot \phi_p$$

$$P_{ди} = 0.285$$

$$P_{и} = 0.125 \text{ МПа} < P_{ди} = 0.285 \text{ МПа}$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины днища и крышки выполняются.

По полученным расчетам можно сделать вывод, что исполнительная толщина стенки днища равная 12 мм обеспечивает надежность конструкции.

#### 4.4 Расчёт толщины стенки гладкой теплообменной рубашки

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр рубашки, мм,  $D_p = 450$ ;
- внутренний радиус эллиптического элемента рубашки, мм,  $R_p = 450$ ;
- высота отбортованной части эллиптического элемента рубашки, мм,  $h_{ор} = 40$ ;
- внутренняя высота выпуклой части эллиптического элемента рубашки, мм,  $H_p = 112,5$ ;
- внутреннее рабочее давление, МПа,  $p_p = 0,1$ ;
- допускаемое напряжение стали для рабочих условий, МПа,  $\sigma_d = 153,5$ ;
- допускаемое напряжение стали для условий гидравлических испытаний, МПа,  $\sigma_{д.20} = 155$ ;
- модуль продольной упругости стали для рабочих условий, МПа,  $E = 2,06 \cdot 10^5$ ;
- модуль продольной упругости стали для условий гидравлических испытаний, МПа,  $E_{и} = 2,1 \cdot 10^5$ .

Цель расчёта - подбор такой толщины стенки рубашки, чтобы была обеспечена прочность и устойчивость данной конструкции. Критерием надёжности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$p_p \leq p_{д.р}$$

где  $p_p$  – расчётное значение наружного давления при рабочих условиях, МПа;  $p_{д.р}$  – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [38].

Критерием надёжности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{p.и} \leq p_{д.р.и}$$

где  $p_{p.и}$  – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа;  $p_{д.р.и}$  – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [38].

4.4.1 Пробное давление для гидравлических испытаний рубашки [38]:

$$p_{p.и} := 1.25 \cdot P_p \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_{руб}} = 0.169 \text{ МПа}$$

где  $P_p$  – расчетное давление при рабочих условиях, МПа;  $\sigma_{руб}$  – допускаемое напряжение материала рубашки при рабочих условиях, МПа;  $\sigma_{20}$  – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания, МПа.

4.4.2 Расчётная толщина цилиндрической обечайки рубашки, нагруженной внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [36]:

$$s_{p.p} = \max \left( \frac{p_p \cdot D_p}{2 \cdot \sigma_{д.р} \cdot \phi - p_p}, \frac{p_{p.и} \cdot D_p}{2 \cdot \sigma_{д.р.20} \cdot \phi - p_{p.и}} \right) \quad (5.21)$$

4.4.3 Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки рубашки:

$$s_p := \text{ceil}[s_{p.p} + (c)] = 3$$

Примем толщину стенки рубашки из стандартного ряда:

$$s_{руб} := 4 \text{ мм}$$

4.4.4 Допускаемое давление для рабочих условий [36]:

$$p_{д.р} = \frac{[2 \cdot \sigma_{д.р} \cdot \phi \cdot (s_p - c)]}{D_p + (s_p - c)} \quad (5.23)$$

Тогда:

$$p_{д.р} = \frac{2 \cdot 153.5 \cdot (8 - 2)}{1950 + (8 - 2)} = 0.942 \text{ МПа}$$

4.4.5 Допускаемое давление для условий испытания [36]:

$$p_{д.р.и} := \frac{[2 \cdot \sigma_{руб.20} \cdot \phi \cdot p \cdot (s_p - c)]}{D_p + (s_p - c)} = 0.615 \text{ МПа}$$

4.4.6 Расчётная толщина эллиптического элемента рубашки, нагруженной внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [36]:

$$s_{1.p.p} = \max \left( \frac{p_p \cdot R_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д.р} - 0.5 \cdot p_p}, \frac{p_{p.и} \cdot R_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д.р.20} - 0.5 \cdot p_{p.и}} \right)$$

где  $R_p$  – внутренний радиус эллиптического элемента рубашки, мм;  $p_p$  – расчётное давление, МПа;  $p_{p.и}$  – пробное давление при гидравлическом испытании, МПа;  $\sigma_{д.р}$  – допускаемое напряжение материала рубашки при рабочих условиях, МПа;  $\sigma_{д.р.и}$  – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания, МПа;  $\phi$  – коэффициент прочности сварного шва, принимаемый для эллиптического элемента рубашки равным 1 [36, 38].

Тогда:

$$s_{1.p.p} := \max \left( \frac{p_p \cdot R_p}{2 \cdot \phi \cdot p \cdot \sigma_{руб} - 0.5 \cdot p_p}, \frac{p_{p.и} \cdot R_p}{2 \cdot \phi \cdot p \cdot \sigma_{руб.20} - 0.5 \cdot p_{p.и}} \right) = 0.331 \text{ мм}$$

4.4.7 Исполнительная толщина стенки эллиптического элемента рубашки:

$$s_{1p} := s_{1.p.p} + c = 2.331 \text{ мм}$$

$$s_{1p} := \text{ceil}(s_{1p}) = 3 \text{ мм}$$

Примем исполнительную толщину стенки эллиптического днища:

$$s_{э.руб} := 4 \text{ мм}$$

4.4.8 Допускаемое давление для рабочих условий [36]:

$$p_{д.1p} := \frac{2(s_{1p} - c) \cdot \phi \cdot p \cdot \sigma_{руб}}{R_p + 0.5(s_{1p} - c)} = 0.603 \text{ МПа}$$

4.4.9 Допускаемое давление для условий испытания [36]:

$$p_{д.1p.и} := \frac{2(s_{1p} - c) \cdot \phi \cdot p \cdot \sigma_{руб.20}}{R_p + 0.5(s_{1p} - c)} = 0.615$$

4.4.10 Проверим надёжность конструкции для рабочих условий:

$$p_p = 0.1 < p_{д.1p} = 0.603,$$

$$p_p = 0.1 < p_{д.1p.и} = 0.615$$

Из расчетов можем сделать вывод, что надёжность рубашки обеспечена.

4.4.11 Проверим надёжность конструкции для условий гидравлического испытания:

$$p_{p.и} = 0.169 < p_{д.1p.и} = 0.615$$

Следовательно, критерий устойчивости соответствует допускаемым значениям, и требуемая надёжность рубашки для условий испытаний обеспечена.



Основываясь на расчетах, делаем вывод, что принятая исполнительная толщина стенки 4 мм обеспечивает надёжность конструкции.

#### 4.5 Расчёт сопряжения обечайки корпуса и днища

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр аппарата, м,  $D = 0,4$ ;
- радиус аппарата, м,  $R = 0,2$ ;
- радиус эллипса крышки, м,  $a = 0,2$ ;
- высота аппарата, м,  $H = 0,6$ ;
- толщина стенки обечайки аппарата, м,  $s = 0,004$ ;
- толщина стенки днища, м,  $s_d = 0,004$ ;
- рабочее давление в корпусе, Па,  $P = 100000$ ;
- рабочее давление в рубашке, Па,  $P_p = 100000$ ;
- допускаемое напряжение стали для рабочих условий, МПа,  $\sigma_d = 184 \cdot 10^6$ ;
- рабочая температура среды, воздействующая на сопряжение, °C,  $t_c = 70$ ;
- коэффициент прочности сварных швов, безразмерный,  $\varphi = 1$ ;
- сумма прибавок к расчётной толщине стенок, м,  $c = 0,002$ ;
- коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий, безразмерный,  $n_p = 2,4$ ;
- коэффициент запаса устойчивости для условий испытания, безразмерный,  $n_{\text{и}} = 1,8$ ;
- модуль упругости материала аппарата при рабочей температуре среды, Па,  $E = 1,95 \cdot 10^{11}$ ;
- коэффициент Пуассона для стали, безразмерный,  $\mu = 0,3$ .

Целью выполнения расчёта является прочностная проверка соединения цилиндрической обечайки с днищем, при возникновении в месте их сопряжения краевых напряжений. Критерием надёжности для соединения, следующее условие:

$$\sigma_{\text{max}} \leq \sigma_{\text{кр.д}}$$

где  $\sigma_{\text{max}}$  – максимальное напряжение, возникающее на краю оболочки, Па;  $\sigma_{\text{кр.д}}$  – допускаемое краевое напряжение, Па [37].

Для определения  $Q_0$  и  $M_0$  составляются уравнения совместности радиальных и угловых деформаций.

Уравнения совместности деформаций для места стыка обечайки с эллиптическим днищем при воздействии внутреннего и внешнего давления:

$$\begin{cases} -\Delta_P^{\Pi} + \Delta_{Q0}^{\Pi} - \Delta_{M0}^{\Pi} = -\Delta_P^{\Xi} - \Delta_{Q0}^{\Xi} - \Delta_{M0}^{\Xi} \\ -\theta_P^{\Pi} + \theta_{Q0}^{\Pi} - \theta_{M0}^{\Pi} = \theta_P^{\Xi} + \theta_{Q0}^{\Xi} + \theta_{M0}^{\Xi} \end{cases} \quad (5.30)$$

4.5.1 Коэффициент затухания:

$$\beta := \frac{4 \sqrt{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{[R \cdot (s - c)]^2}} \beta = 64.27 \text{ 1/м}$$

$$\beta_{\Xi} := \frac{4 \sqrt{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{[a \cdot (s_{\Xi} - c)]^2}} \beta_{\Xi} = 64.27 \text{ 1/м}$$

$$\Delta_{\Pi P P} := \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P_P \quad \Delta_{\Pi P P} = 0$$

$$\Delta_{\Pi P} := \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P \quad \Delta_{\Pi P} = 9.026 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_{\Pi Q0} := 2 \cdot \beta \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} \quad \Delta_{\Pi Q0} = 1.325 \times 10^{-8}$$

$$\Delta_{\Pi M0} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} \quad \Delta_{\Pi M0} = 8.517 \times 10^{-7}$$

$$\Delta_{\Xi P P} := P_P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_{\Xi} - c)]} \cdot \left( 2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) \quad \Delta_{\Xi P P} = 0$$

$$\Delta_{\Xi P} := P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_{\Xi} - c)]} \cdot \left( 2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) \quad \Delta_{\Xi P} = -0.012$$

$$\Delta_{\Xi Q0} := 2 \cdot \beta_{\Xi} \cdot \frac{a^2}{(s_{\Xi} - c) \cdot E} \quad \Delta_{\Xi Q0} = 1.325 \times 10^{-8}$$

$$\Delta_{\Xi M0} := 2 \cdot \beta_{\Xi}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\Xi} - c) \cdot E} \quad \Delta_{\Xi M0} = 8.517 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\Pi P p} := 0$$

$$\theta_{\Pi P} := 0$$

$$\theta_{\Im P p} := 0$$

$$\theta_{\Im P} := 0$$

$$\theta_{\Pi Q 0} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} \quad \theta_{\Pi Q 0} = 8.517 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\Pi M 0} := 4 \cdot \beta^3 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} \quad \theta_{\Pi M 0} = 1.095 \times 10^{-4}$$

$$\theta_{\Im Q 0} := 2 \cdot \beta_{\Im}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\Im} - c) \cdot E} \quad \theta_{\Im Q 0} = 8.517 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\Im M 0} := 4 \cdot \beta_{\Im}^3 \cdot \frac{a^2}{(s_{\Im} - c) \cdot E} \quad \theta_{\Im M 0} = 1.095 \times 10^{-4}$$

$$Q_0 = 8,013 \cdot 10^5 \text{ Н/м},$$

$$M_0 = 0$$

4.5.2 Суммарное меридиональное напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{m\Im} = -\sigma_{Ppm\Im} + \sigma_{Pm\Im} + \sigma_{Q0m\Im} + \sigma_{M0m\Im} \quad (5.44)$$

Тогда:

$$\sigma_{m\Im 1} = -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\Im} - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\Im} - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\Im} - c)^2} = 4.5 \times 10^7 \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{m\Im 2} = -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\Im} - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\Im} - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\Im} - c)^2} = 4.5 \times 10^7 \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{m\Im} = \max(|\sigma_{m\Im 1}|, |\sigma_{m\Im 2}|) = 4.5 \times 10^7 \text{ Па}$$

4.5.3 Суммарное кольцевое напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{t\Im} = -\sigma_{Ppt\Im} + \sigma_{Pt\Im} + \sigma_{Q0t\Im} + \sigma_{M0t\Im}$$

Тогда:

$$\sigma_{m\Im 1} := -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\Im} - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\Im} - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\Im} - c)^2}$$

$$\sigma_{m\vartheta 1} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$\sigma_{m\vartheta 2} := -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\vartheta} - c)]} + P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\vartheta} - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\vartheta} - c)^2}$$

$$\sigma_{m\vartheta 2} := 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$\sigma_{m\vartheta} := \max(|\sigma_{m\vartheta 1}|, |\sigma_{m\vartheta 2}|)$$

$$\sigma_{m\vartheta} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

- КОЛЬЦЕВОЕ:

$$\sigma_{t\vartheta 1} := -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_{\vartheta} - c)]} + P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_{\vartheta} - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_{\vartheta} \cdot \frac{a}{(s_{\vartheta} - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_{\vartheta}^2 \cdot \frac{a}{(s_{\vartheta} - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_{\vartheta} - c)^2}$$

$$\sigma_{t\vartheta 1} = 0.227 \text{ Па}$$

$$\sigma_{t\vartheta 2} := -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_{\vartheta} - c)]} + P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_{\vartheta} - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_{\vartheta} \cdot \frac{a}{(s_{\vartheta} - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_{\vartheta}^2 \cdot \frac{a}{(s_{\vartheta} - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_{\vartheta} - c)^2}$$

$$\sigma_{t\vartheta 2} = 0.227 \text{ Па}$$

$$\sigma_{t\vartheta} := \max(|\sigma_{t\vartheta 1}|, |\sigma_{t\vartheta 2}|)$$

$$\sigma_{t\vartheta} = 0.227 \text{ Па}$$

- меридиональное:

$$\sigma_{m01} := -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2}$$

$$\sigma_{m0} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$\sigma_{m02} := -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2}$$

$$\sigma_{m0} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$\sigma_{mo} := \max(|\sigma_{mo1}|, |\sigma_{mo2}|)$$

$$\sigma_{mo} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

- КОЛЬЦЕВОЕ:

$$\sigma_{to1} := -P_p \cdot \frac{R}{(s-c)} + P \cdot \frac{R}{(s-c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s-c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s-c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s-c)^2}$$

$$\sigma_{to1} = -0.227 \text{ Па}$$

$$\sigma_{to2} := -P_p \cdot \frac{R}{(s-c)} + P \cdot \frac{R}{(s-c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s-c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s-c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s-c)^2}$$

$$\sigma_{to2} = -0.227 \text{ Па}$$

$$\sigma_{to} := \max(|\sigma_{to1}|, |\sigma_{to2}|)$$

$$\sigma_{to} = 0.227 \text{ Па}$$

4.5.4 Допускаемое напряжение на краю элемента [37]:

$$\sigma_{кр.д} = 2.392 \times 10^8 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{mo} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{maxэ} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

4.5.5 Проверка условия прочности для эллиптического днища и цилиндрической обечайки.

$$\sigma_{mo} = 1.15 \times 10^8 < 2.015 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д},$$

$$\sigma_{maxэ} = 1.15 \times 10^8 < 2.015 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д},$$

Из расчетов следует, что значения краевых напряжений для обечайки и днища соответствуют допускаемым значениям. Следовательно, надёжность сопряжения обечайки и днища обеспечена.

#### 4.6 Расчёт сопряжения обечайки рубашки и днища

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр аппарата, м,  $D = 0,45$ ;
- радиус аппарата, м,  $R = 0,113$ ;
- радиус эллипса крышки, м,  $a = 0,113$ ;
- толщина стенки обечайки аппарата, м,  $s = 0,008$ ;
- толщина стенки днища, м,  $s_d = 0,008$ ;
- рабочее давление в рубашке, Па,  $P = 100000$ ;
- допускаемое напряжение стали для рабочих условий, МПа,  $\sigma_d = 153,5 \cdot 10^6$ ;
- рабочая температура среды, воздействующая на сопряжение, °C,  $t_c = 70$ ;
- коэффициент прочности сварных швов, безразмерный,  $\varphi = 1$ ;
- сумма прибавок к расчётной толщине стенок, м,  $c = 0,002$ ;
- коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий, безразмерный,  $n_p = 2,4$ ;
- коэффициент запаса устойчивости для условий испытания, безразмерный,  $n_{\text{и}} = 1,8$ ;
- модуль упругости материала аппарата при рабочей температуре среды, Па,  $E = 1,94 \cdot 10^{11}$ ;
- коэффициент Пуассона для стали, безразмерный,  $\mu = 0,3$ .

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{кр.д}}$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение, возникающее на краю оболочки, Па;  $\sigma_{\text{кр.д}}$  – допускаемое краевое напряжение, Па [37].

Реализуемый принцип расчёта – тот же, что и в предыдущем подразделе.

#### 4.6.1 Коэффициент затухания:

$$\beta := \frac{4 \sqrt{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{[R \cdot (s - c)]^2}} \quad \beta = 60.595 \text{ 1/м}$$

$$\beta_{\text{э}} := \frac{4 \sqrt{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{[a \cdot (s_{\text{э}} - c)]^2}} \quad \beta_{\text{э}} = 60.595 \text{ 1/м}$$

$$\Delta_{\text{II}Pp} := \frac{(2-\mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s-c)} \cdot P_p \quad \Delta_{\text{II}Pp} = 1.109 \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{\text{II}P} := \frac{(2-\mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s-c)} \cdot P \quad \Delta_{\text{II}P} = 1.109 \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{\text{II}Q0} := 2 \cdot \beta \cdot \frac{R^2}{(s-c) \cdot E} \quad \Delta_{\text{II}Q0} = 1.581 \times 10^{-8}$$

$$\Delta_{\text{II}M0} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s-c) \cdot E} \quad \Delta_{\text{II}M0} = 9.581 \times 10^{-7}$$

$$\Delta_{\text{III}Pp} := P_p \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_3 - c)]} \cdot \left( 2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) \quad \Delta_{\text{III}Pp} = -1.5 \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{\text{III}P} := P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_3 - c)]} \cdot \left( 2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) \quad \Delta_{\text{III}P} = -1.5 \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{\text{III}Q0} := 2 \cdot \beta_3 \cdot \frac{a^2}{(s_3 - c) \cdot E} \quad \Delta_{\text{III}Q0} = 1.581 \times 10^{-8}$$

$$\Delta_{\text{III}M0} := 2 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a^2}{(s_3 - c) \cdot E} \quad \Delta_{\text{III}M0} = 9.581 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\text{II}Pp} := 0$$

$$\theta_{\text{II}P} := 0$$

$$\theta_{\text{III}Pp} := 0$$

$$\theta_{\text{III}P} := 0$$

$$\theta_{\text{II}Q0} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s-c) \cdot E} \quad \theta_{\text{II}Q0} = 9.581 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\text{II}M0} := 4 \cdot \beta^3 \cdot \frac{R^2}{(s-c) \cdot E} \quad \theta_{\text{II}M0} = 1.161 \times 10^{-4}$$

$$\theta_{\text{э}Q0} := 2 \cdot \beta_{\text{э}}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} \quad \theta_{\text{э}Q0} = 9.581 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\text{э}M0} := 4 \cdot \beta_{\text{э}}^3 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} \quad \theta_{\text{э}M0} = 1.161 \times 10^{-4}$$

$$Q_0 = 0 \text{ Н/м,}$$

$$M_0 = 0$$

4.6.2 Допускаемое напряжение на краю элемента [37]:

$$\sigma_{\text{кр.д}} = 1.989 \times 10^8$$

Максимальное напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{\text{maxэ}} = 0 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{\text{maxо}} = 0 \text{ Па}$$

4.6.3 Проверка условия прочности для эллиптического днища и цилиндрической обечайки.

$$\sigma_{\text{maxэ}} = 0 < \sigma_{\text{кр.д}} = 1.989 \times 10^8$$

$$\sigma_{\text{maxо}} = 0 < \sigma_{\text{кр.д}} = 1.989 \times 10^8$$

## 4.7 Расчёт фланцевого соединения корпуса с крышкой

Исходные данные для расчёта [39]:

- внутренний диаметр аппарата, мм,  $D_1 = 400$ ;
- наружный диаметр фланца, мм,  $D_n = 535$ ;
- диаметр болтовой окружности, мм,  $D_6 = 495$ ;
- диаметр середины прокладки, мм,  $D_{\text{сп}} = 447$ ;
- ширина прокладки, мм,  $b_n = 10$ ;
- высота фланца, мм,  $h = 18$ ;
- высота прокладки, мм,  $h_n = 2$ ;
- толщина обечайки и крышки, мм,  $s_1 = 4$ ;  $s_2 = 12$ ;



- диаметр болтов, мм,  $d = 20$ ;
- число болтов, шт,  $n = 16$ ;
- площадь поперечного сечения болта,  $\text{мм}^2$ ,  $f_b = 225$ ;
- расчётное наружное давление на крышки, МПа,  $P = 0,1$ ;
- прибавка к толщине стенки, мм,  $c_0 = 2$ ;
- температура среды в аппарате,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 70$ ;
- рабочая температура фланца,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\phi} = 67,2$ ;

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции фланцевого соединения. Критериями надёжности являются прочность болтов при затяжке и в рабочих условиях, прочность прокладки, статическая прочность соединения при затяжке и в рабочих условиях, а также соответствия угла поворота фланца допускаемому значению. Данные критерии описываются следующими условиями:

$$\sigma_{61} \leq \sigma_{206}$$

где  $\sigma_{61}$  – напряжение, возникающее в болтах при затяжке, МПа.

$$\sigma_{62} \leq \sigma_{д.6}$$

где  $\sigma_{62}$  – напряжение, возникающее в болтах при рабочих условиях, МПа.

$$q \leq q_d$$

где  $q$  – удельное давление на прокладку, МПа;  $q_d$  – допускаемое удельное давление на прокладку, МПа.

$$\sigma_{3\max} < K_T \cdot \sigma_{20}$$

$$\sigma_{P\max} < K_T \cdot \sigma_{д.ф}$$

где  $\sigma_{3\max}$  – максимальное напряжение, возникающее в болтах при затяжке, МПа;  $\sigma_{P\max}$  – максимальное напряжение, возникающее в болтах при рабочих условиях, МПа;  $K_T$  – коэффициент, учитывающий температурные деформации, принимаемый равным 1,3 [39].

$$\Theta \leq 1,3 \cdot \Theta_d$$

где  $\Theta$  – величина угла поворота фланца,  $^{\circ}$ ;  $\Theta_d$  – допускаемая величина угла поворота фланца,  $^{\circ}$ .

Расчёт производится в соответствии со стандартом [39].

Расчетные параметры фланцев:

Параметр длины обечайки:

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S_0}$$

$$l_0 = 63.246 \text{ мм}$$

Отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру:

$$K_1 := \frac{D_H}{D}$$

$$K_1 = 1.337$$

Коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца:

$$\beta_T := \frac{K_1^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K_1) - 1)}{(1.05 + 1.945 \cdot K_1^2) \cdot (K_1 - 1)}$$

$$\beta_T = 1.264$$

$$\beta_U := \frac{K_1^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K_1) - 1)}{1.36(K_1^2 - 1) \cdot (K_1 - 1)}$$

$$\beta_U = 5.335$$

$$\beta_Y := \left[ \frac{1}{(K_1 - 1)} \right] \cdot \left[ 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K_1^2 \cdot \log(K_1)}{(K_1^2 - 1)} \right]$$

$$\beta_Y = 6.898$$

$$\beta_Z := \frac{K_1^2 + 1}{K_1^2 - 1}$$

$$\beta_Z = 3.535$$

Коэффициенты для фланцевых соединений с приварным встык фланцами с прямой втулкой, плоскими фланцами и свободными фланцами:

$$\beta_F := 0.91$$

$$\beta_V := 0.55$$

$$f_{\text{вн}} := 1$$

Коэффициент  $\lambda$ :

$$\lambda_1 := \left( \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} \right) + \left( \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot S_0^2} \right)$$

$$\lambda_1 = 1.091$$

Угловая податливость фланцев:

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda_1 \cdot l_0 \cdot S_0^2}$$

$$y_\Phi = 3.644 \times 10^{-10} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\phi H} := \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H}$$

$$y_{\phi H} = 3.862 \times 10^{-10} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками (болтами):

$$C_F := \max \left[ 1, \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot D_6}{n \cdot \left[ 2 \cdot d + \left( \frac{6 \cdot h}{m_1 + 0.5} \right) \right]}} \right]$$

$$C_F = 1.131$$

Приведенный диаметр плоского фланца:

$$D_{\text{пр}} := D$$

Плечо действия усилий в болтах (шпильках) для приварных встык и плоских фланцев:

$$b := 52 \text{ мм}$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев:

$$e_1 := 0.5 \cdot |D_{\text{сп}} - D - S_0| = 18.5$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев:

$$S_9 := S_0$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев:

$$\gamma_1 := \frac{1}{y_{\Pi} + y_6 \cdot \left( \frac{E_{6.20}}{E_6} \right) + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E}}$$

$$\gamma_1 = 4.391 \times 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой для приварных встык и плоских фланцев с плоскими прокладками:

$$\alpha_1 := 1 - \frac{y_{\Pi} - 2 \cdot e \cdot y_{\phi} \cdot b}{y_{\Pi} + y_6 + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi}}$$

$$\alpha_1 = 0.988$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M := \frac{y_{\bar{6}} + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b \cdot \left[ b + e - \left( \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right) \right]}{y_{\bar{6}} + y_{\Pi} \cdot \left( \frac{D_{\bar{6}}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b^2} \quad \alpha_M = 0.978$$

Нагрузка, вызванная стесненностью температурных деформаций, в соединениях с приварным встык и плоскими фланцами:

$$Q_t := \gamma_1 \cdot \left[ 2 \cdot \alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20) - 2 \cdot \alpha_{\bar{6}} \cdot h \cdot (t_{\bar{6}} - 20) \right]$$

$$Q_t = 2.066 \times 10^3 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения:

$$P_{\bar{6}1} := \max \left[ \alpha_1 \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}}, \left[ \alpha_1 \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \left( \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right) - Q_t \right] \right]$$

$$P_{\bar{6}1} = -3.681 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов (шпилек):

$$P_{\bar{6}2} := \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\bar{6}} \cdot \sigma_{20\bar{6}})$$

$$P_{\bar{6}2} = 2.218 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) фланцевых соединений при затяжке фланцевого соединения:

$$P_{\bar{6}M} := \max(P_{\bar{6}1}, P_{\bar{6}2})$$

$$P_{\bar{6}M} = 2.218 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) фланцевых соединений в рабочих условиях:

$$P_{\bar{6}p} := P_{\bar{6}M} + (1 - \alpha_1) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{сп}}}$$

$$P_{\bar{6}p} = 2.2 \times 10^5 \text{ Н}$$

Проверка прочности болтов (шпиле) и прокладки.

Расчетные напряжения в болтах (шпильках):

- при затяжке:

$$\sigma_{\sigma 1} := \frac{P_{\sigma m}}{A_{\sigma}}$$

$$\sigma_{\sigma 1} = 61.6 \text{ МПа}$$

- в рабочих условиях:

$$\sigma_{\sigma 2} := \frac{P_{\sigma p}}{A_{\sigma}}$$

$$\sigma_{\sigma 2} = 61.118 \text{ МПа}$$

Проверка условий прочности болтов (шпилек) при затяжке и в рабочих условиях:

$$\sigma_{\sigma 1} = 61.6 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{20\sigma} = 154 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\sigma 1} < \sigma_{20\sigma}$$

$$\sigma_{\sigma 2} = 61.118 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{д.\sigma} = 152 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\sigma 2} < \sigma_{д.\sigma}$$

В результате расчетов убедились, что условия прочности плоских фланцев выполняются.

Удельное давление на прокладку:

$$q := \frac{\max(P_{\sigma m}, P_{\sigma p})}{\pi \cdot D_{\sigma \Pi} \cdot b_{\Pi}}$$

$$q = 3.223 \text{ МПа}$$

Условие прочности прокладки:

$$q = 3.223 \text{ МПа}$$

$$q_d = 130 \text{ МПа}$$

$$q = 3.223 < q_d = 130$$

Из полученных расчетных данных делаем вывод, что условие прочности прокладки выполняется.

Расчет фланцев на статическую прочность:

Расчетный изгибающий момент, действующий на приварной встык фланца или плоский фланец при затяжке:

$$M_M := C_F \cdot P_{\sigma m} \cdot b$$

$$M_M = 1.304 \times 10^7 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях:

$$M_p := C_F \cdot \max \left[ P_{\text{бр}} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e \right]$$

$$M_p = 1.484 \times 10^7 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

- меридиональное изгибное напряжение во втулке приварного встык фланца, обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0M} := \frac{M_M}{\lambda_1 \cdot [S_0 - (c)]^2 \cdot D_{\text{пр}}}$$

$$\sigma_{0M} = 466.737 \text{ МПа}$$

- напряжения в тарелке приварного встык фланца или плоского фланца в условиях затяжки:

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{RM} := \left[ \frac{(1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0)}{\lambda_1 \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \right] \cdot M_M$$

$$\sigma_{RM} = 123.952 \text{ МПа}$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{TM} := \left[ \frac{(\beta_Y \cdot M_M)}{h^2 \cdot D} \right] - \beta_Z \cdot \sigma_{RM}$$

$$\sigma_{TM} = 255.906 \text{ МПа}$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условия:

- меридиональные изгибные напряжения для приварных встык фланцев с прямой втулкой и плоских фланцев:

$$\sigma_{0p} := \frac{M_p}{\lambda_1 \cdot [S_0 - (c)]^2 \cdot D_{\text{пр}}}$$

$$\sigma_{0p} = 531.143 \text{ МПа}$$

- максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0mp} := \max \left[ \left[ \frac{Q_d + F + \frac{(4 \cdot |M|)}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D - S_0) \cdot (S_0 - c)} \right], \left[ \frac{Q_d + F - \frac{(4 \cdot |M|)}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D - S_0) \cdot (S_0 - c)} \right] \right]$$

$$\sigma_{0mp} = -38.911 \text{ МПа}$$

Напряжения в тарелке приварного встык фланца или плоского фланца в рабочих условиях:

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{Rp} := \left[ \frac{(1.33 \cdot \beta \cdot F \cdot h + l_0)}{\lambda_1 \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \right] \cdot M_p$$

$$\sigma_{Rp} = 141.057 \text{ МПа}$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{Tp} := \left[ \frac{(\beta \cdot Y \cdot M_p)}{h^2 \cdot D} \right] - \beta \cdot Z \cdot \sigma_{Rp}$$

$$\sigma_{Tp} = 291.219 \text{ МПа}$$

Проверка условий статической прочности фланцев:

$K_T = 1.3$  при расчете с учетом стесненности температурных деформаций.

При расчете без учета стесненности температурных деформаций  $K_T = 1$ .

$$K_T := 1.3$$

$$\text{Prov\_8} := \begin{cases} \text{PR\_1} & \text{if } \max(|\sigma_{0M} + \sigma_{RM}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{TM}|) > K_T \cdot \sigma_{20} \\ \text{PR\_2} & \text{if } \max(|\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}|, |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}|, |\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}|) > K_T \cdot \sigma_d \\ \text{PR\_3} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\text{Prov\_8} = \text{"Условия статической прочности в рабочих условиях выполняются"}$

$$\max(|\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}|, |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}|, |\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}|) = 861.274$$

$$K_T \cdot \sigma_{d.\phi} = 234$$

$$\max(|\sigma_{0M} + \sigma_{RM}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{TM}|) = 722.643$$

$$K_T \cdot \sigma_{20} = 239.2$$

Проверка углов поворота фланца:

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца:

$$\theta := M_p \cdot y_f \cdot \frac{E_{20}}{E}$$

$$\theta = 5.547 \times 10^{-3}$$

Допустимый угол поворота плоского фланца:

$$\theta_d := 0.013$$

$$1.3 \cdot \theta_d > \theta$$

$$1.3 \cdot \theta_d = 0.017 > \theta = 5.547 \times 10^{-3}$$

Условие поворота плоского фланца выполняется

Результаты расчетов:

При проведении расчетов были выполнены расчеты критериев прочности фланцев, болтов и прокладки. Все необходимые условия выполняются.

Надежность конструкция фланцевого соединения выполняется.

#### 4.8 Расчет вала для перемешивающего устройства реактора

Целью расчёта является проверка надёжности конструкции вала по критериям виброустойчивости, жёсткости и прочности. Неравенства, выражающие эти критерии, имеют следующий вид:

$$\frac{\omega}{\omega_{0k}} \leq 0,7$$

где  $\omega$  – угловая скорость, с-1 ;  $\omega_{0k}$  – критическая угловая скорость, с-1 [40].

$$Az_j \leq Az_{j.d}$$

где  $Az_j$  – динамическое смещение оси вращения вала вследствие зазоров опор в опасном по жёсткости сечении, м;  $Az_{j.d}$  – допускаемое смещение оси вращения вала в опасном по жёсткости сечении, м [19, 43].

$$\sigma_{\text{экв}} \leq \sigma_d$$

где  $\sigma_{\text{экв}}$  – эквивалентное напряжение в опасном по прочности сечении, МПа;  $\sigma_d$  – допускаемое напряжение в опасном по прочности сечении, МПа [31].

Исходные данные:

- внутренний диаметр аппарата, мм:  $D := 400$
- марка стали вала: Ст.5сп
- плотность материала мешалки, кг/м<sup>3</sup>:  $\rho_B = 7.85 \times 10^3$
- плотность перемешивающей среды, кг/м<sup>3</sup>:  $\rho_c := 1100$
- количество мешалок на валу, шт: 1
- диаметр мешалки, мм:  $d_m = 250$
- диаметр вала мешалки, мм:  $d_v = 25$  мм



- длина вала, мм:  $L_B = 420$
- масса вала мешалки, кг:  $m_L = 9.865$
- мощность привода, кВт:  $N_{пр} := 1.1$

#### 4.8.1 Расчет на виброустойчивость

Рассчитаем однопролетный вал.

Относительная приведенная масса детали для однопролетных валов рассчитывается по формуле 17 [40, стр.22]:

Линейная масса вала рассчитывается по следующей формуле:

$$d_B := 25 \text{ мм}$$

Плотность материала вала:

$$\rho_B := 7.85 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$m_L := \pi \cdot \frac{\left(\frac{d_B}{1000}\right)^2}{4} \cdot \rho_B = 9.865 \text{ кг}$$

Безразмерные динамические прогибы  $y_i$  для однопролетного вала определяют по графику (рисунок 5.7) [40], как функцию относительных координат  $l_i$  центров масс деталей, расположенных на валу.



Рисунок 4.2 - График для определения безразмерных прогибов[40]

Длина вала от начала закрепления вала в верхних подшипниках до концевой опоры:

$$L_B := 0.420 \text{ м}$$

Конструктивно распределим лопасти по длине вала:

$$l_1 := 340 \text{ мм}$$

Относительные координаты  $l_{i\text{отн}}$  определяем для однопролетных валов по формуле 23[3]

$$l_{1\text{отн}} := \frac{l_1}{L_B} = 809.524$$

Определяем по рисунку 5.7 безразмерные прогибы вала:

$$y_{11} := 0.6$$

Массу лопастей берем по таблице П-17 [41]:

$$m_i := 2.5 \text{ кг}$$

Приведенная масса каждой  $i$  - детали в пролете :

$$m_{1\text{пр}} := m_i \cdot y_{11}^2 = 0.9 \text{ кг}$$

Относительная приведенная масса детали для однопролетных валов:

$$m_{\text{пр}} := \frac{m_{1\text{пр}}}{m_L \cdot L_B} = 0.217 \text{ кг}$$

Для однопролетного вала коэффициент приведения массы вала

$$q := 0.5$$

$$M_{\text{пр}} := m_{\text{пр}} + q \cdot m_L \cdot L_B = 2.289$$

Из расчета следует, что реальный вал (весомый вал с закрепленными на нем деталями) можно заменить эквивалентным ему невесомым валом с сосредоточенной приведенной массой.

Приближенный диаметр виброустойчивого вала:

$$d_p = \sqrt{A_1 + \sqrt{A_1^2 + A_2}}$$

где:

$$A_1 = q \cdot f \cdot L_B^2 \quad \text{и} \quad A_2 = \frac{(8 \cdot m_{\text{пр}} \cdot L_B \cdot f)}{\pi \cdot \rho_B}$$

Безразмерный коэффициент, учитывающий виброустойчивость вала, рассчитывается по следующей формуле:

$$f = \frac{(8 \cdot \rho_B \cdot \omega^2 \cdot L_B^2)}{\xi \cdot \eta \cdot E}$$

где  $\rho$  - плотность среды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\omega$  - угловая скорость,  $\text{с}^{-1}$ ;  $L_1$  - длина вала, м;  $\xi$  - коэффициент из условия виброустойчивости для жёсткого вала, работающего в системе жидкость-жидкость;  $\eta$  - коэффициент, учитывающий условия закрепления вала;  $E$  - модуль упругости материала вала, МПа.

В соответствии с имеющимися данными и формулами пособия [40] определяем составляющие формулы как:

$$\eta_w = 48$$

$$E = 1.99 \cdot 10^{11}$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = 23.04 \text{ с}^{-1}$$

$$\xi = 0.7$$

Подставляем значения и получаем:

$$f := \frac{(8 \cdot \rho_B \cdot \omega^2 \cdot L_B^2)}{\xi \cdot \eta \cdot E} = 8.794 \times 10^{-7}$$

Тогда:

$$A_1 := q \cdot f \cdot L_B^2 = 7.756 \times 10^{-8}$$

$$A_2 := \frac{(8 \cdot m_{\text{пр}} \cdot L_B \cdot f)}{\pi \cdot \rho_B} = 2.603 \times 10^{-11}$$

В результате приближенное значение диаметра вала равно:

$$d_p := \sqrt{A_1 + \sqrt{A_1^2 + A_2}} = 2.276 \times 10^{-3}$$

Полученное приближенное значение не превышает выбранный изначально диаметр в 25 мм следовательно диаметр вала не изменяется в результате расчетов.

$$d_p = d_B = 25 \text{ мм}$$

Осей момент инерции поперечного сечения вала:

$$J := \pi \cdot \frac{\left(\frac{d_B}{1000}\right)^4}{64} = 1.257 \times 10^{-7} \text{ м}^4$$

Корень частотного уравнения для реального вала определяем согласно графику [40]:

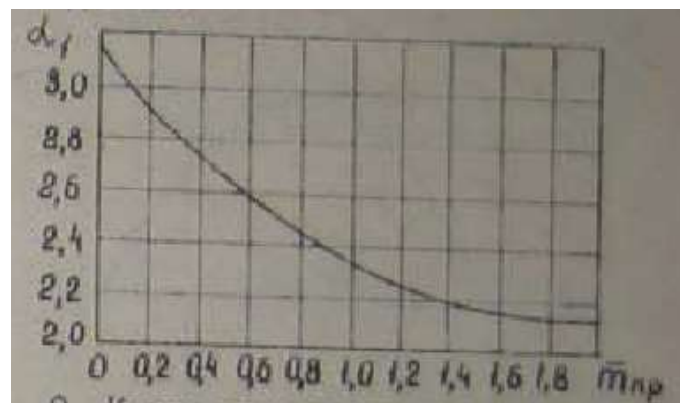


Рисунок 4.3 - Корни частотного уравнения для однопролетного вала

$$m_{\text{пр}} = 0.217 \text{ кг}$$

Тогда:  $\alpha_1 = 3.5$

Первая критическая скорость реального вала:

$$\omega_{\text{крр}} = \left( \frac{\alpha_1^2}{L_B^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{(E \cdot J)}{m_L}} = 3.496 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$$

Проверка требуемого условия:

$$\frac{\omega}{\omega_{\text{крр}}} = 6.589 \times 10^{-3} \leq 0.7$$

Согласно произведенным расчетам можем видеть, что условие принятия изначально длины вала выполняется. Отношение первой критической скорости реального вала рассчитанной для  $d=25$  мм и номинальной скорости вала не превышает значение заданное источником [40]. Следовательно, рассчитанный вал удовлетворяет условию виброустойчивости.

#### 4.8.2 Расчет вала на жесткость

При расчете динамических прогибов вала необходимо учитывать: радиальные перемещения  $\Delta z$  сечений из-за имеющихся зазоров  $\Delta_A$  и  $\Delta_B$  в подшипниках [37], начальную изогнутость  $\varepsilon(z)$  из-за погрешностей его изготовления [37] и эксцентриситеты  $e_i$  и  $e_{1i}$  сосредоточенных масс  $m_i$  и  $m_{1i}$  [37].

Эксцентриситет массы мешалки:

$$e_M = \frac{10^{-3}}{\sqrt{\omega}} = 2.083 \times 10^{-4} \text{ м}$$

Приведенный эксцентриситет мешалок в опасном по жёсткости сечении (торцевое уплотнение):

$$e_{\text{м.1.пр}} = \frac{e_M}{y_{11}} = 3.472 \times 10^{-4} \text{ м}$$

Приведенная масса вала:

$$m_{\text{в.пр}} = q \cdot (m_L \cdot L_B) = 2.072 \text{ кг}$$

Радиальные зазоры опор однопролетного вала:

$$\Delta_{z,j} = \frac{(\Delta_B - \Delta_A) \cdot z_j}{L_B} + \Delta_A$$

$$\Delta_A = 12 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Радиальные зазоры по основному ряду в радиальных подшипниках, м;

$$\Delta_B = 29 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$L_B = 0.42 \text{ м}$$

Длина пролета вала

$$l_1 := 0.32$$

Координата мешалки, и уплотнения соответственно

$$z_1 = l_1$$

$$z_{уп} = 0.19$$

Таким образом, для опасных сечений в центрах тяжести мешалок и уплотнения:

$$\Delta_{z.уп} = \left[ \frac{(\Delta_B - \Delta_A) \cdot z_{уп}}{L_B} + \Delta_A \right] = 1.969 \times 10^{-5} \text{ м}$$

$$\Delta_{z.1} = \left[ \frac{(\Delta_B - \Delta_A) \cdot z_1}{L_B} + \Delta_A \right] = 2.495 \times 10^{-5} \text{ м}$$

Смещение оси вала от оси вращения за счет начальной изогнутости вала:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_B \cdot y_{1j}$$

где  $y_{1j}$  - безразмерный прогиб вала в опасном сечении;  $\varepsilon_B$  - начальная изогнутость вала в точке приведения.

Для мешалок и торцевого уплотнения:

безразмерный прогиб вала для торцевого уплотнения из рисунка 5.7

$$y_{уп} := 0.6$$

$$\varepsilon_{z.уп} = \varepsilon_B \cdot y_{уп} = 2.4 \times 10^{-5} \text{ м}$$

$$\varepsilon_{z.м.1} = \varepsilon_B \cdot y_{11} = 2.4 \times 10^{-5} \text{ м}$$

Смещение  $\Delta_B$  вала в точке приведения связано с зазорами в подшипниках соотношением:

$$\Delta_B := \frac{\Delta_A + \Delta_B}{2} = 2.05 \times 10^{-5} \text{ м}$$

Приведенный эксцентриситет массы консольного вала с одной мешалкой:

$$e_{пр} = \frac{\sum_{j=1}^n (m_{пр.1j} \cdot e_{пр.1j})}{m_{сум.пр} + m_{в.пр}} + \Delta_B + \varepsilon_B$$

где  $m_{пр.1j}$  - приведенная масса элемента, кг;  $e_{пр.1j}$  - эксцентриситет элемента, м;  $m_{в.пр}$  - приведенная масса вала, кг.

Тогда:

$$e_{\text{пр}} = \frac{m_{1\text{пр}} \cdot e_{\text{м.1.пр}}}{m_{\text{в.пр}}} + \Delta_B + \varepsilon_B = 2.114 \times 10^{-4} \text{ м}$$

Динамический прогиб вала в точке приведения:

$$y_B = \frac{e_{\text{пр}}}{\frac{\omega_{\text{крп}}}{\omega} - 1} = 1.402 \times 10^{-6} \text{ м}$$

Динамическое смещение центра тяжести вала в местах крепления мешалок, и точке приведения В:

$$A_{\text{з.уп}} = -y_B \cdot y_{\text{луп}} + \Delta_{\text{з.уп}} + \varepsilon_{\text{з.уп}} = 4.285 \times 10^{-5} \text{ м}$$

$$A_{\text{з.м.1}} = -y_B \cdot y_{\text{л1}} + \Delta_{\text{з.1}} + \varepsilon_{\text{з.м.1}} + e_{\text{м.1.пр}} = 3.953 \times 10^{-4} \text{ м}$$

$$A_B = y_B + \varepsilon_B + \Delta_B = 6.19 \times 10^{-5} \text{ м}$$

Проверка жёсткости исходя из условия в пособии [37] при допускаемом смещении вала в точке приведения В по стандарту [42]:

$$A_{\text{з.уп.д}} = 0.25 \cdot 10^{-3} \text{ м} \geq A_{\text{з.уп}} = 4.285 \times 10^{-5} \text{ м}$$

Делаем вывод, что рассчитанное значение перемещения вала в месте установки уплотнения не превышает допускаемое. Согласно этому делаем вывод, что надежность конструкции по условию жесткости обеспечена.

#### 4.8.3 Расчет вала на прочность

Опасными сечениями по прочности для данного вала являются точки расположения мешалок[37].

В общем случае, сосредоточенная центробежная сила, действующая на мешалку, расположенную на консоли:

$$F_{1j.Q} = m_{1j} \cdot \omega^2 \cdot A_{1.1j.Q} + Q_{1j}$$

где  $m_{1j}$  - приведенная масса мешалки,  $\omega$  - угловая скорость;  $A_{1.1j.Q}$  - динамическое смещение оси вала от вращения мешалки;  $Q_{1j}$  - поперечная нагрузка, действующая на мешалку.

Поскольку на вал не действуют поперечные нагрузки, а остальные параметры были определены в предыдущих подпунктах работы, имеем:

$$F_{1j.Q.m.1} = m_{1\text{пр}} \cdot \omega^2 \cdot A_{\text{з.м.1}} = 0.189 \text{ Н}$$

Приведенная центробежная сила, действующая на вал в точке приведения В:

$$F_{\text{в.пр.Q}} = m_{\text{в.пр}} \cdot \omega^2 \cdot A_B = 0.068 \text{ Н}$$

Реакция верхней и нижней опор:

$$R_A = \frac{B_1}{L_B} + F_{в.пр}$$

$$R_B = \frac{B_3}{L_B} + F_{в.пр}$$

где при

$$l_{1j.м.1} := \frac{l_1}{1000} = 3.2 \times 10^{-4} \text{ м}$$

$$B_1 = F_{1j.Q.м.1} \cdot (L_B - l_{1j.м.1}) = 0.07 \text{ Н}$$

$$B_3 = F_{1j.Q.м.1} \cdot l_{1j.м.1} = 6.043 \times 10^{-5} \text{ Н}$$

Тогда:

$$R_A = \frac{B_1}{L_B} + F_{в.пр} \cdot Q = 0.257 \text{ Н} \quad R_B = \frac{B_3}{L_B} + F_{в.пр} \cdot Q = 0.068 \text{ Н}$$

Изгибающий момент в опасных по прочности сечениях:

$$M_{и.м.1} = F_{в.пр} \cdot Q \cdot L_B + F_{1j.Q.м.1} \cdot (L_B - l_{1j.м.1}) = 0.095 \text{ Н·м}$$

Крутящий момент в местах установки мешалки:

$$M_{\text{кв}} = \frac{N_{пр} \cdot 1000}{\omega} = 30.384 \text{ Н·м}$$

Момент сопротивления вала в опасных по прочности сечениях:

$$W_Z = \frac{\pi \cdot (d_p)^3}{32} = 3.395 \times 10^{-6} \text{ Н·м}$$

Эквивалентные напряжения в опасных сечениях:

$$\sigma_{\text{эkv.м.1}} = \frac{\sqrt{M_{и.м.1}^2 + M_{\text{к}}^2}}{W_Z \cdot 10^6} = 8.949 \text{ Па}$$

Допускаемые напряжения в опасных сечениях определяются по формуле:

$$\sigma_{д.з1j} = \frac{\varepsilon_M \cdot \sigma_1}{K_{\sigma.з1j} \cdot n_{\min}}$$

$$\varepsilon_M = 0.82$$

для углеродистой стали по пособию [37]

$$\sigma_B = 520 \text{ МПа}$$

предел прочности стали Ст3 [37];

$$\sigma_1 = 0.5 \cdot \sigma_B = 260 \text{ МПа}$$

Поскольку в местах установки мешалок имеются шпоночные канавки, выполненные торцевой фрезой:

$$K_{\sigma.zj} = 1.4$$

$n_{\min} = 2$  коэффициент устойчивости, принимаемый ориентировочно.

Тогда:

$$\sigma_{д.м} = \frac{\varepsilon M \cdot \sigma_1}{K_{\sigma.zj} \cdot n_{\min}} = 76.143 \text{ МПа}$$

Условия прочности конструкции в местах крепления мешалок:

$$\sigma_{\text{экв.м.1}} \leq \sigma_{д.м}$$

$$\sigma_{\text{экв.м.1}} = 8.949 \leq \sigma_{д.м} = 76.143$$

Рассчитанные напряжения в опасных сечениях меньше допускаемых, соответственно, надежность конструкции вала по прочности обеспечена.

4.8.4 Итоги расчетов:

- прочность вала из условия виброустойчивости выполняется;
- прочность вала из условия жесткости выполняется;
- выполнение условий механической прочности вала обеспечено.

Следовательно, по всем необходимым критериям обеспечивается надежность конструкции вала.

## 4.9 Укрепление отверстий

Исходные данные:

- внутренний диаметр аппарата:  $D := 400 \text{ мм}$
- марка стали 16ГС
- внутреннее расчетное давление:  $P_r := 0.1 \cdot 10^6 \text{ Па}$
- исполнительная толщина стенки оболочки:  $s := 4 \text{ мм}$
- берем внутренний диаметр штуцера 1:  $d_1 := 15 \text{ мм}$
- диаметр внутреннего отверстия под штуцер 2:  $d_2 := 15 \text{ мм}$
- прибавка к расчетной толщине стенки:  $c := 2 \text{ мм}$
- коэффициент прочности сварных швов:  $\phi := 0.9$
- допускаемое напряжение в рабочем состоянии при  $t := 70^\circ\text{C}$ :



$$\sigma_d := 184 \cdot 10^6$$

- высота стандартного эллиптического днища:  $H := 0.25 \cdot D_{\text{мм}}$
- толщину стенки штуцера принимаем:  $s_1 := 1.5 \text{ мм}$
- исполнительная толщина накладного кольца:  $s_2 := 0 \text{ мм}$
- длина внешней части штуцера:  $l_1 := 36 \text{ мм}$
- длина внутренней части штуцера:  $l_2 := 40 \text{ мм}$
- длина неукрепленной части оболочки  $l := 324 \text{ мм}$

Исполнительная ширина накладного кольца  $l_3 := 0 \text{ мм}$

$$x_a := 158.5 \quad x_{\text{ш}} := 158.5$$

Толщина эллиптической оболочки:

Радиус кривизны -  $R := D$

$$s_p := \frac{Pr \cdot R}{4 \cdot \phi \cdot \sigma_d - Pr}$$

$$s_p = 0.06 \text{ мм}$$

С учетом прибавки на коррозию:

$$s_{pc} := s_p + c$$

$$s_{pc} = 2.06$$

Расчетная толщина стенки штуцеров:

$$s_{p1} := \frac{Pr \cdot (d1 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_d \cdot \phi - Pr}$$

$$s_{p1} = 5.738 \times 10^{-3} \text{ мм}$$

$$s_{p2} := \frac{Pr \cdot (d2 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_d \cdot \phi - Pr}$$

$$s_{p2} = 5.738 \times 10^{-3} \text{ мм}$$

Наружный диаметр отверстий:

$$d1_n := d1 + 2 \cdot s_{p1} = 15.011 \text{ мм}$$

$$d2_n := d2 + 2 \cdot s_{p2} = 15.011 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр:

$$D_{p1} := \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \left( \frac{D^2 - 4 \cdot H^2}{D^4} \right) \cdot x_a^2}$$

$$D_{p1} = 581.836 \text{ мм}$$

$$D_{p2} := \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \left( \frac{D^2 - 4 \cdot H^2}{D^4} \right) \cdot x_{III}^2}$$

$$D_{p2} = 581.836 \text{ мм}$$

Принимаем диаметр равный 590 мм

$$D_p := 590 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр отверстия:

$$d_{p1} := \frac{d1 + 2 \cdot c}{\sqrt{1 - \left( \frac{2 \cdot x_a}{D_p} \right)^2}}$$

$$d_{p1} = 22.528 \text{ мм}$$

$$d_{p2} := \frac{d2 + 2 \cdot c}{\sqrt{1 - \left( \frac{2 \cdot x_{III}}{D_p} \right)^2}}$$

$$d_{p2} = 22.528 \text{ мм}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$\frac{d_{p1} - 2 \cdot c}{D} < 0.6$$

$$\frac{d_{p1} - 2 \cdot c}{D} = 0.046 < 0.6$$

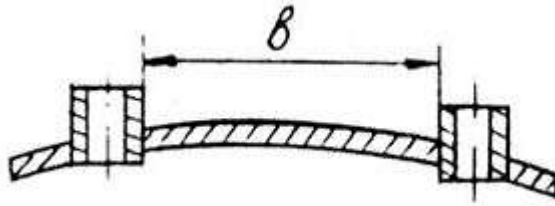
$$\frac{d_{p2} - 2 \cdot c}{D} < 0.6$$

$$\frac{d_{p2} - 2 \cdot c}{D} = 0.046 < 0.6$$

$$\frac{s - c}{D} < 0.1$$

$$\frac{s - c}{D} = 5 \times 10^{-3} < 0.1$$

Определяем расстояние между стенками штуцеров:



$$b := x_a + x_{ш} - \frac{d_{p1}}{2} - \frac{d_{p2}}{2}$$

$$b = 294.472 \text{ мм}$$

$$b \geq \sqrt{D_{p1} \cdot (s - c)} + \sqrt{D_{p2} \cdot (s - c)}$$

Проверяем необходимость укрепления отверстий:

$$b = 294.472 > \sqrt{D_{p1} \cdot (s - c)} + \sqrt{D_{p2} \cdot (s - c)} = 68.225$$

Расчетная толщина стенки:

$$s_{расч} := \frac{Pr \cdot D_p}{4 \cdot \phi \cdot \sigma_D - Pr}$$

$$s_{расч} = 0.089 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 := 2 \cdot \left[ \left( \frac{s - c}{s_{расч}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p1} \cdot (s - c)}$$

$$d_0 = 1.477 \times 10^3 \text{ мм}$$

Проверка условий необходимости дальнейшего расчета укреплений отверстий:

$$d_0 = 1.477 \times 10^3 > d_{p1} = 22.528$$

$$d_0 = 1.477 \times 10^3 > d_{p2} = 22.528$$

В результате расчетов можно сделать вывод, что необходимые условия выполняются. Следовательно, при данных диаметрах штуцеров обеспечивается жесткость конструкции.

#### 4.10 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки теплообменника

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр обечайки, мм,  $D = 325$ ;
- внутреннее рабочее давление, МПа,  $p_{\text{раб}} = 0,2$ ;
- плотность пара,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\rho = 1119$ ;
- высота цилиндрической обечайки, м,  $H = 1,5$ ;
- допускаемое напряжение стали для рабочих условий, МПа,  $\sigma_d = 171,5$ ;
- допускаемое напряжение стали для условий гидравлических испытаний,

МПа,  $\sigma_{d,20} = 250,5$ .

Цель данного расчёта заключается в том, чтобы найти толщины стенки цилиндрической обечайки, при которой будет обеспечена прочность конструкции теплообменника.

Критерием надёжности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$p \leq p_d$$

где  $p$  – расчётное значение наружного давления при рабочих условиях, МПа;  $p_d$  – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [36,37].

Критерием надёжности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{\text{и}} \leq p_{d,\text{и}}$$

где  $p_{\text{и}}$  – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа;  $p_{d,\text{и}}$  – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [36].

#### 4.10.1 Расчётное давление при рабочих условиях

$$P_p := P_a + \frac{\rho \cdot g \cdot H}{10^9}$$

где  $\rho$  – плотность смеси в реакторе,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$  [38].

Тогда:

$$P_p = 0.215 \text{ МПа}$$

#### 4.10.2 Пробное давление для гидравлических испытаний аппарата [38]

$$P_{\text{и}} := 1.25 \cdot P_a \cdot \frac{\sigma_{d20}}{\sigma_d}$$

где  $P_a$  – расчетное давление при рабочих условиях, МПа;  $\sigma_d$  – допускаемое напряжение материала аппарата при рабочих условиях, МПа;  $\sigma_{d,20}$  – допускаемое напряжение материала аппарата при условиях гидравлического испытания, МПа.

Тогда:

$$P_{\text{и}} = 0.268 \text{ МПа}$$

4.10.3 Расчётная толщина цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [36]

$$S_p := \max \left( \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_d - P_a}, \frac{P_{и} \cdot D}{2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_{и} - P_{и}} \right)$$

где  $D$  – внутренний диаметр аппарата, мм;  $P_a$  – расчётное давление, МПа;  $P_{и}$  – пробное давление при гидравлическом испытании, МПа;  $\sigma_d$  – допускаемое напряжение материала аппарата при рабочих условиях, МПа;  $\sigma_{и}$  – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания,  $\phi$  – коэффициент прочности сварного шва, принимаемый для цилиндрической обечайки рубашки равным 1 [36, 38].

Тогда:

$$S_p = 0.204 \text{ мм}$$

#### 4.10.4 Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки

$$s \geq s_p + c$$

где  $c$  – прибавка на различные виды разрушений, мм [36].

Тогда:

$$S_1 = 3 \text{ мм}$$

Примем исполнительную толщину из стандартного ряда значений, а именно 4 мм.

#### 4.10.5 Допускаемое давление для условий испытания [36]:

$$P_{д.и} := \frac{[2 \cdot \sigma_d \cdot \phi_p \cdot [(S_1) - c]]}{D + [(S_1) - c]} = 1.052 \text{ МПа}$$

#### 4.10.6 Проверим надёжность конструкции для рабочих условий

$$P_p = 0.215 < P_{д.и} = 1.052$$

Следовательно, критерий устойчивости соответствует допускаемым значениям, а надёжность цилиндрической обечайки для рабочих условий выполнена.

#### 4.10.7 Проверим надёжность конструкции для условий гидравлического испытания:

$$P_{и} = 0.268 < P_{д.и} = 1.052$$

Таким образом, можно сделать вывод, что критерий устойчивости соответствует допускаемым значениям, а надёжность цилиндрической обечайки для условий испытаний обеспечена.

#### 4.10.8 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [36]:

$$S_K = (c)$$

$$D = 0,006 \leq 0,1$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины обечайки выполняются.

Так как условия надёжности выполняются, то можно сделать вывод о возможности применения данной толщины обечайки.

#### 4.11 Расчёт толщины стенки эллиптической крышки и днища

Исходные данные для расчёта:

- внутренний радиус днища, мм,  $R_{кр} = 325$ ;
- высота отбортовки днища или крышки, мм,  $h_0 = 25$ ;
- внутреннее расчётное давление, МПа,  $p = 0,1$ ;
- пробное давление при гидравлическом испытании, МПа,  $p_{и} = 0,103$ ;
- допускаемое напряжение стали для рабочих условий, МПа,  $\sigma_{д} = 184$ ;
- допускаемое напряжение стали для условий гидравлических испытаний,

МПа,  $\sigma_{д.20} = 218$ .

Целью выполнения расчёта является подбор такой толщины стенки эллиптических днища и крышки, чтобы была обеспечена прочность данных конструкций. Критерием надёжности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$p \leq p_{д.1}$$

где  $p$  – расчётное значение наружного давления при рабочих условиях, МПа;  $p_{д.1}$  – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [1, 2].

Критерием надёжности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{и} \leq p_{д1.и}$$

где  $p_{и}$  – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа;  $p_{д1.и}$  – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [1].

4.11.1 Расчётная толщина эллиптического днища, нагруженного внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [36]:

$$s_{1.p} = \max \left( \frac{p \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д} - 0.5 \cdot p}, \frac{p_{и} \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д.20} - 0.5 \cdot p_{и}} \right)$$

Тогда:

$$S_{1.p} = 0.094 \text{ мм}$$

4.11.2 Исполнительная толщина стенки эллиптического днища:

$$s_1 \geq s_{1.p} + c$$

где  $c$  – прибавка на различные виды разрушений, мм [36].

Тогда:

$$S_{д} = 3 \text{ мм}$$

Примем исполнительную толщину из стандартного ряда значений, а именно 4 мм.

4.11.3 Допускаемое давление для рабочих условий [36]:

$$P_{д.1} = \frac{2(s_1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_d}{R + 0.5(s_1 - c)}$$

Тогда:

$$P_{д1} = 1.063 \text{ МПа}$$

4.11.4 Проверим надёжность конструкции для рабочих условий:

$$P_{и} = 0,103 \leq P_{д1} = 1.063$$

Следовательно, критерий устойчивости соответствует допускаемым значениям и надёжность эллиптических днища и крышки для рабочих условий обеспечена.

4.11.2 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [3]:

$$\begin{aligned} & (S_{p.y} = c) \\ & 0,002 \leq \frac{D}{H_1} = 0,003 \leq 0,1 \\ & 0,2 \leq D = 0,252 \leq 0,5 \end{aligned}$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины днища и крышки выполняются.

По полученным расчетам можно сделать вывод, что исполнительная толщина стенки днища равная 4 мм обеспечивает надёжность конструкции.

#### 4.12 Расчёт сопряжения обечайки корпуса и днища

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр аппарата, м,  $D = 0,325$ ;
- радиус аппарата, м,  $R = 0,162$ ;
- радиус эллипса крышки, м,  $a = 0,162$ ;
- высота аппарата, м,  $H = 1,7$ ;
- толщина стенки обечайки аппарата, м,  $s = 0,004$ ;
- толщина стенки днища, м,  $s_d = 0,004$ ;
- рабочее давление в корпусе, Па,  $P = 200000$ ;
- рабочее давление в рубашке, Па,  $P_p = 100000$ ;
- допускаемое напряжение стали для рабочих условий, МПа,  $\sigma_d = 171.5$ ;
- рабочая температура среды, воздействующая на сопряжение, °C,  $t_c = 120$ ;
- коэффициент прочности сварных швов, безразмерный,  $\phi = 1$ ;
- сумма прибавок к расчётной толщине стенок, м,  $c = 0,002$ ;

- коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий, безразмерный,  $n_p = 2,4$ ;
- коэффициент запаса устойчивости для условий испытания, безразмерный,  $n_{\text{и}} = 1,8$ ;
- модуль упругости материала аппарата при рабочей температуре среды, Па,  $E = 1,89 \cdot 10^{11}$ ;
- коэффициент Пуассона для стали, безразмерный,  $\mu = 0,3$ .

Целью выполнения расчёта является прочностная проверка соединения цилиндрической обечайки с днищем, при возникновении в месте их сопряжения краевых напряжений. Критерием надёжности для соединения, следующее условие:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{кр.д}}$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение, возникающее на краю оболочки, Па;  $\sigma_{\text{кр.д}}$  – допускаемое краевое напряжение, Па [37].

Для определения  $Q_0$  и  $M_0$  составляются уравнения совместности радиальных и угловых деформаций.

Уравнения совместности деформаций для места стыка обечайки с эллиптическим днищем при воздействии внутреннего и внешнего давления:

$$\begin{cases} -\Delta_p^{\text{II}} + \Delta_{Q0}^{\text{II}} - \Delta_{M0}^{\text{II}} = -\Delta_p^{\text{III}} - \Delta_{Q0}^{\text{III}} - \Delta_{M0}^{\text{III}} \\ -\theta_p^{\text{II}} + \theta_{Q0}^{\text{II}} - \theta_{M0}^{\text{II}} = \theta_p^{\text{III}} + \theta_{Q0}^{\text{III}} + \theta_{M0}^{\text{III}} \end{cases}$$

4.12.1 Коэффициент затухания:

$$\beta := \frac{4 \sqrt{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{[R \cdot (s - c)]^2}} \beta = 64.27 \text{ 1/м}$$

$$\beta_{\text{э}} := \frac{4 \sqrt{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{[a \cdot (s_{\text{э}} - c)]^2}} \beta_{\text{э}} = 64.27 \text{ 1/м}$$

$$\Delta_{\text{цРр}} := \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P_{\text{р}} \quad \Delta_{\text{цРр}} = 0$$

$$\Delta_{\text{цР}} := \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P \quad \Delta_{\text{цР}} = 9.026 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_{\text{цQ0}} := 2 \cdot \beta \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} \quad \Delta_{\text{цQ0}} = 1.325 \times 10^{-8}$$



$$\Delta_{\text{uM0}} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} \quad \Delta_{\text{uM0}} = 8.517 \times 10^{-7}$$

$$\Delta_{\text{pP}} := P_p \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_{\text{p}} - c)]} \cdot \left( 2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) \quad \Delta_{\text{pP}} = 0$$

$$\Delta_{\text{p}} := P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_{\text{p}} - c)]} \cdot \left( 2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) \quad \Delta_{\text{p}} = -0.012$$

$$\Delta_{\text{Q0}} := 2 \cdot \beta_{\text{p}} \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{p}} - c) \cdot E} \quad \Delta_{\text{Q0}} = 1.325 \times 10^{-8}$$

$$\Delta_{\text{M0}} := 2 \cdot \beta_{\text{p}}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{p}} - c) \cdot E} \quad \Delta_{\text{M0}} = 8.517 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\text{uP}} := 0$$

$$\theta_{\text{u}} := 0$$

$$\theta_{\text{pP}} := 0$$

$$\theta_{\text{p}} := 0$$

$$\theta_{\text{uQ0}} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} \quad \theta_{\text{uQ0}} = 8.517 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\text{uM0}} := 4 \cdot \beta^3 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} \quad \theta_{\text{uM0}} = 1.095 \times 10^{-4}$$

$$\theta_{\text{Q0}} := 2 \cdot \beta_{\text{p}}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{p}} - c) \cdot E} \quad \theta_{\text{Q0}} = 8.517 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\text{M0}} := 4 \cdot \beta_{\text{p}}^3 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{p}} - c) \cdot E} \quad \theta_{\text{M0}} = 1.095 \times 10^{-4}$$

$$Q_0 = 8,013 \cdot 10^5 \text{ H/M},$$

$$M_0 = 0$$

4.12.2 Суммарное меридиональное напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{mэ} = -\sigma_{Ppmэ} + \sigma_{Pmэ} + \sigma_{Q0mэ} + \sigma_{M0mэ} \quad (5.44)$$

Тогда:

$$\sigma_{mэ1} = -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_э - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_э - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s_э - c)^2} = 4.5 \times 10^7 \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{mэ2} = -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_э - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_э - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s_э - c)^2} = 4.5 \times 10^7 \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{mэ} = \max(|\sigma_{mэ1}|, |\sigma_{mэ2}|) = 4.5 \times 10^7 \text{ Па}$$

4.12.3 Суммарное кольцевое напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{tэ} = -\sigma_{Pptэ} + \sigma_{Ptэ} + \sigma_{Q0tэ} + \sigma_{M0tэ}$$

Тогда:

$$\sigma_{mэ1} := -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_э - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_э - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s_э - c)^2}$$

$$\sigma_{mэ1} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$\sigma_{mэ2} := -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_э - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_э - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s_э - c)^2}$$

$$\sigma_{mэ2} := 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$\sigma_{mэ} := \max(|\sigma_{mэ1}|, |\sigma_{mэ2}|)$$

$$\sigma_{mэ} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

- кольцевое:

$$\sigma_{tэ1} := -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_э - c)]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_э - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_э \cdot \frac{a}{(s_э - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_э^2 \cdot \frac{a}{(s_э - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_э - c)^2}$$

$$\sigma_{tэ1} = 0.227 \text{ Па}$$

$$\sigma_{t\vartheta 2} := -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{\left[2 \cdot (s_{\vartheta} - c)\right]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{\left[2 \cdot (s_{\vartheta} - c)\right]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_{\vartheta} \cdot \frac{a}{(s_{\vartheta} - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_{\vartheta}^2 \cdot \frac{a}{(s_{\vartheta} - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_{\vartheta} - c)}$$

$$\sigma_{t\vartheta 2} = 0.227 \text{ Па}$$

$$\sigma_{t\vartheta} := \max\left(\left|\sigma_{t\vartheta 1}\right|, \left|\sigma_{t\vartheta 2}\right|\right)$$

$$\sigma_{t\vartheta} = 0.227 \text{ Па}$$

- меридиональное:

$$\sigma_{mo1} := -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2}$$

$$\sigma_{mo} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$\sigma_{mo2} := -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2}$$

$$\sigma_{mo} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$\sigma_{mo} := \max\left(\left|\sigma_{mo1}\right|, \left|\sigma_{mo2}\right|\right)$$

$$\sigma_{mo} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

- кольцевое:

$$\sigma_{to1} := -P_p \cdot \frac{R}{(s - c)} + P \cdot \frac{R}{(s - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2}$$

$$\sigma_{to1} = -0.227 \text{ Па}$$

$$\sigma_{to2} := -P_p \cdot \frac{R}{(s - c)} + P \cdot \frac{R}{(s - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2}$$

$$\sigma_{to2} = -0.227 \text{ Па}$$

$$\sigma_{to} := \max\left(\left|\sigma_{to1}\right|, \left|\sigma_{to2}\right|\right)$$

$$\sigma_{to} = 0.227 \text{ Па}$$

4.12.4 Допускаемое напряжение на краю элемента [37]:

$$\sigma_{кр.д} = 2.392 \times 10^8 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{mo} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{max\varnothing} = 1.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

4.12.5 Проверка условия прочности для эллиптического днища и цилиндрической обечайки.

$$\sigma_{mo} = 1.15 \times 10^8 < 2.015 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д.},$$

$$\sigma_{max\varnothing} = 1.15 \times 10^8 < 2.015 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д.},$$

Из расчетов следует, что значения краевых напряжений для обечайки и днища соответствуют допускаемым значениям. Следовательно, надёжность сопряжения обечайки и днища обеспечена.

#### 4.13 Расчет фланцевого соединения корпуса с крышкой

Для внешнего диаметра аппарата 400 мм и максимальным давлением 0.1 МПа выбираем из ГОСТ 28759.2-90 фланец, который будет соответствовать требованиям.

$$D_H := 435 \text{ мм}$$

$$D_{\varnothing} := 395 \text{ мм}$$

$$D_{СП} := 365 \text{ мм}$$

$$D := 325 \text{ мм}$$

$$a := 10$$

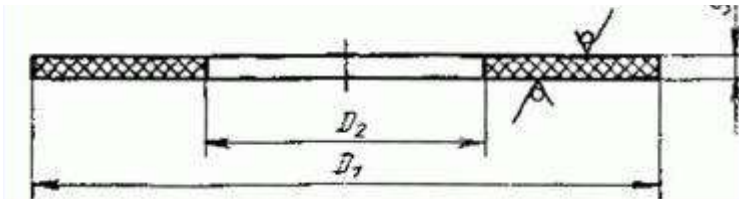
$$h := 18 \text{ мм}$$

$$S_0 := 10 \text{ мм}$$

$$D_{\text{БОЛТОВ}} := 22 \text{ мм}$$

$$n := 12$$

Из ГОСТ 28759.6-90 выбираем прокладки для нашего аппарата. Материалом прокладки будет служить паронит ПОМ.



$$b_{\Pi} := 49 \text{ мм}$$

$$h_{\Pi} := 2 \text{ мм}$$

$$P_{\text{руб}} := 0.1 \text{ МПа}$$

$$M := 1.15 \cdot 10^7 \text{ Н*мм}$$

Фланцы с гладкой уплотнительной поверхностью рекомендуется применять для условных давлений среды до 1,6 МПа

Выбор крепежных элементов:

$$b_s := 1$$

$$t_p := 70$$

Материалом для болтов послужит сталь Ст3.

#### 4.13.1 Определение расчетных параметров

##### Расчетные температуры

Расчетная температура неизолированных плоских фланцев:

$$t_{\Phi} := 0.71 \cdot (t_p)$$

$$t_{\Phi} = 49.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Расчетная температура болтов:

$$t_b := 0.71 \cdot (t_p)$$

$$t_b = 49.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для болтов из стали Ст3:

##### В рабочем состоянии

$$t := \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix}$$

$$\sigma := \begin{pmatrix} 154 \\ 149 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{д.б}} := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_b), 0.5)$$

$$\sigma_{\text{д.б}} = 152 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для болтов при рабочей температуре

$$E_b := 1.94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для болтов при  $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$E_{b,20} := 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для болтов при  $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\sigma_{20b} := 154 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали Ст3 при  $t = 20\text{-}200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_b := 12.6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$$

Допускаемые напряжения для фланцев и обечаек стали 16ГС:

$$t := \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} ^\circ\text{C} \quad \sigma := \begin{pmatrix} 184 \\ 174 \end{pmatrix} \text{ МПа}$$

$$\sigma := \text{Floor}\left(\text{interp}(t, \sigma, t_{\text{ф}}), 0.5\right)$$

$$\sigma = 180 \text{ МПа}$$

Так как фланцы изготавливаются из листового проката:

$$\eta := 1$$

$$\sigma_{\text{д.ф}} := \eta \cdot \sigma$$

$$\sigma_{\text{д.ф}} = 180 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для стали 16ГС при расчетной температуре:

$$E := 1.94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 16ГС при  $t = 20$  оС:

$$\sigma_{20} := 184 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{д}20} := \eta \cdot \sigma_{20}$$

$$\sigma_{\text{д}20} = 184 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для стали 16ГС при температуре испытания  $20$  °С:

$$E_{20} := 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 16ГС при  $t = 20$ - $200$  оС:

$$\alpha_{\text{ф}} := 17 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{К}}$$

Эффективная ширина плоской прокладки:

$$b_{\text{п}} = 49 \text{ мм}$$

$$b_0 := \begin{cases} b_0 \leftarrow b_{\text{п}} & \text{if } b_{\text{п}} \leq 15 \\ b_0 \leftarrow \text{Ceil}(3.8 \cdot \sqrt{b_{\text{п}}}, 1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$b_0 = 27$$

Характеристики прокладки по табл. 4.6:

$$m_1 := 2.5$$

$$q_{\text{обж}} := 20 \text{ МПа}$$

$$q_d := 130 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{обж}} := 0.9 \text{ МПа}$$

$$E_{\text{п}} := 200 \text{ МПа}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{обж}} := 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m_1 \cdot |P_{\text{руб}}|$$

$$P_{\text{обж}} = 3.87 \times 10^3 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения

герметичности фланцевого соединения:

$$R_{\Pi} := \begin{cases} \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m_1 \cdot P_{\text{руб}} & \text{if } P_{\text{руб}} \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$R_{\Pi} = 7.74 \times 10^3 \text{ Н}$$

Площадь поперечного сечения болтов (шпилек) по табл. 4.3:

$$f_{\text{б}} := 225 \text{ мм}^2$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\text{б}} := n \cdot f_{\text{б}}$$

$$A_{\text{б}} = 2.7 \times 10^3 \text{ мм}^2$$

Равнодействующая нагрузка от давления:

$$Q_{\text{д}} := \left( \frac{\pi}{4} \right) \cdot D_{\text{сп}}^2 \cdot P_{\text{руб}}$$

$$Q_{\text{д}} = 1.046 \times 10^4 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента:

$$Q_{\text{FM}} := \max \left( \left| F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right|, \left| F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right| \right)$$

$$Q_{\text{FM}} = 6.26 \times 10^5$$

Податливость прокладки:

$$y_{\Pi} := \frac{h_{\Pi} \cdot K_{\text{обж}}}{E_{\Pi} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\Pi}}$$

$$y_{\Pi} = 1.602 \times 10^{-7} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

Расстояние между опорными поверхностями гайки и головки болта или опорными поверхностями гаек по ГОСТ 15589-70:

$$L_{\text{б0}} := 82 \text{ мм}$$

Эффективная длина болта (шпильки) при определении податливости:

$$L_{\text{б}} := \begin{cases} L_{\text{б0}} + 0.28 \cdot d & \text{if } b_s = 1 \\ L_{\text{б0}} + 0.56 \cdot d & \text{if } b_s = 2 \end{cases}$$

$$L_{\text{б}} = 88.16$$

Податливость болтов:

$$y_{\text{б}} := \frac{L_{\text{б}}}{E_{\text{б.20}} \cdot A_{\text{б}}}$$

$$y_6 = 1.641 \times 10^{-7} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

#### 4.13.2 Расчетные параметры фланцев:

Параметр длины обечайки:

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S_0}$$

$$l_0 = 57.009 \text{ мм}$$

Отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру:

$$K_1 := \frac{D_H}{D}$$

$$K_1 = 1.338$$

Коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца:

$$\beta_T := \frac{K_1^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K_1) - 1)}{(1.05 + 1.945 \cdot K_1^2) \cdot (K_1 - 1)}$$

$$\beta_T = 1.264$$

$$\beta_U := \frac{K_1^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K_1) - 1)}{1.36 \cdot (K_1^2 - 1) \cdot (K_1 - 1)}$$

$$\beta_U = 5.323$$

$$\beta_Y := \left[ \frac{1}{(K_1 - 1)} \right] \cdot \left[ 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K_1^2 \cdot \log(K_1)}{(K_1^2 - 1)} \right]$$

$$\beta_Y = 6.882$$

$$\beta_Z := \frac{K_1^2 + 1}{K_1^2 - 1}$$

$$\beta_Z = 3.527$$

Коэффициенты для фланцевых соединений с приварным встык фланцами с прямой втулкой, плоскими фланцами и свободными фланцами:

$$\beta_F := 0.91$$

$$\beta_V := 0.55$$

$$f_{\text{мн}} := 1$$

Коэффициент  $\lambda$ :

$$\lambda_1 := \left( \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} \right) + \left( \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot S_0^2} \right)$$



$$\lambda_1 = 1.125$$

**Угловая податливость фланцев:**

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_{\phi} := \frac{0.91 \cdot \beta \cdot V}{E_{20} \cdot \lambda_1 \cdot l_0 \cdot S_0^2}$$

$$y_{\phi} = 3.923 \times 10^{-10} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\phi H} := \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H}$$

$$y_{\phi H} = 3.791 \times 10^{-10} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками (болтами):

$$C_F := \max \left[ 1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_6}{n \cdot \left[ 2 \cdot d + \left( \frac{6 \cdot h}{m_1 + 0.5} \right) \right]}} \right]$$

$$C_F = 1.137$$

Приведенный диаметр плоского фланца:

$$D_{\text{пр}} := D$$

Плечо действия усилий в болтах (шпильках) для приварных встык и плоских фланцев:

$$b_{\text{ww}} := 52 \text{ мм}$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев:

$$e_1 := 0.5 \cdot |D_{\text{сп}} - D - S_0| = 15$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев:

$$S_9 := S_0$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев:

$$\gamma_1 := \frac{1}{y_{\text{п}} + y_6 \cdot \left( \frac{E_{6.20}}{E_6} \right) + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E}}$$

$$\gamma_1 = 3.992 \times 10^5$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой для приварных встык и плоских фланцев с плоскими прокладками:

$$\alpha_1 := 1 - \frac{y_{\Pi} - 2 \cdot e \cdot y_{\Phi} \cdot b}{y_{\Pi} + y_{\Phi} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\Phi}}$$

$$\alpha_1 = 0.98$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M := \frac{y_{\Phi} + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b \cdot \left[ b + e - \left( \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right) \right]}{y_{\Phi} + y_{\Pi} \cdot \left( \frac{D_{\Phi}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b^2}$$

$$\alpha_M = 0.966$$

Нагрузка, вызванная стесненностью температурных деформаций, в соединениях с приварным встык и плоскими фланцами:

$$Q_t := \gamma_1 \cdot \left[ 2 \cdot \alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20) - 2 \cdot \alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20) \right]$$

$$Q_t = 1.878 \times 10^3$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения:

$$P_{\Phi 1} := \max \left[ \left[ \alpha_1 \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right], \left[ \alpha_1 \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \left( \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right) - \right] \right]$$

$$P_{\Phi 1} = -3.502 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов (шпилек):

$$P_{\Phi 2} := \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\Phi} \cdot \sigma_{206})$$

$$P_{\Phi 2} = 1.663 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) фланцевых соединений при затяжке фланцевого соединения:

$$P_{\Phi M} := \max(P_{\Phi 1}, P_{\Phi 2})$$

$$P_{\Phi M} = 1.663 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) фланцевых соединений в рабочих условиях:

$$P_{\Phi p} := P_{\Phi M} + (1 - \alpha_1) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{сп}}}$$

$$P_{\Phi p} = 1.626 \times 10^5 \text{ Н}$$

#### 4.13.3 Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки

Расчетные напряжения в болтах (шпильках):

- при затяжке:

$$\sigma_{б1} := \frac{P_{бм}}{A_{б}}$$

$$\sigma_{б1} = 61.6 \text{ МПа}$$

- в рабочих условиях:

$$\sigma_{б2} := \frac{P_{бр}}{A_{б}}$$

$$\sigma_{б2} = 60.222 \text{ МПа}$$

**Проверка условий прочности болтов (шпилек) при затяжке и в рабочих условиях:**

```
Prov_6 := | "Условия прочности при затяжке НЕ выполняются" if  $\sigma_{б1} > \sigma_{20б}$   
          | "Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются" if  $\sigma_{б2} > (\sigma_{д.б})$   
          | "Условия прочности выполняются" otherwise
```

Prov\_6 = "Условия прочности выполняются"

$$\sigma_{б1} = 61.6 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{20б} = 154 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{б2} = 60.222 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{д.б} = 152 \text{ МПа}$$

Удельное давление на прокладку:

$$q := \frac{\max(P_{бм}, P_{бр})}{\pi \cdot D_{сп} \cdot b_{п}}$$

$$q = 2.96 \text{ МПа}$$

**Условие прочности прокладки (проверяется для мягких прокладок):**

```
Prov_7 := | "Условие прочности прокладки НЕ выполняется" if  $q > q_d$   
          | "Условие прочности прокладки выполняется" otherwise
```

Prov\_7 = "Условие прочности прокладки выполняется"

$$q = 2.96 \text{ МПа}$$

$$q_d = 130 \text{ МПа}$$

**Расчет фланцев на статическую прочность:**

Расчетный изгибающий момент, действующий на приварной встык фланца или

плоский фланец при затяжке:

$$M_M := C_F \cdot P_{\sigma M} \cdot b$$

$$M_M = 9.833 \times 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях:

$$M_p := C_F \cdot \max \left[ P_{\sigma p} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e \right]$$

$$M_p = 1.158 \times 10^7 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

### Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

- меридиональное изгибное напряжение во втулке приварного встык фланца, обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0M} := \frac{M_M}{\lambda_1 \cdot [S_0 - (c)]^2 \cdot D_{\text{пр}}}$$

$$\sigma_{0M} = 420.399 \text{ МПа}$$

- напряжения в тарелке приварного встык фланца или плоского фланца в условиях затяжки:

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{RM} := \left[ \frac{(1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0)}{\lambda_1 \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \right] \cdot M_M$$

$$\sigma_{RM} = 114.776 \text{ МПа}$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{TM} := \left[ \frac{(\beta_Y \cdot M_M)}{h^2 \cdot D} \right] - \beta_Z \cdot \sigma_{RM}$$

$$\sigma_{TM} = 237.807 \text{ МПа}$$

### Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

- меридиональные изгибные напряжения для приварных встык фланцев с прямой втулкой и плоских фланцев:

$$\sigma_{0p} := \frac{M_p}{\lambda_1 \cdot [S_0 - (c)]^2 \cdot D_{\text{пр}}}$$

$$\sigma_{0p} = 495.098 \text{ МПа}$$

- максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0mp} := \max \left[ \left[ \frac{Q_d + F + \frac{(4 \cdot |M|)}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D - S_0) \cdot (S_0 - c)} \right], \left[ \frac{Q_d + F - \frac{(4 \cdot |M|)}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D - S_0) \cdot (S_0 - c)} \right] \right]$$

$$\sigma_{0mp} = -45.916 \text{ МПа}$$

**Напряжения в тарелке приварного встык фланца или плоского фланца в рабочих условиях:**

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{Rp} := \left[ \frac{(1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0)}{\lambda_1 \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \right] \cdot M_p$$

$$\sigma_{Rp} = 135.17 \text{ МПа}$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{Tp} := \left[ \frac{(\beta_Y \cdot M_p)}{h^2 \cdot D} \right] - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp}$$

$$\sigma_{Tp} = 280.062 \text{ МПа}$$

**Проверка условий статической прочности фланцев:**

PR\_1 := "Условия статической прочности при затяжке выполняются"

PR\_2 := "Условия статической прочности в рабочих условиях выполняются"

PR\_3 := "Условия статической прочности выполняются"

KT = 1.3 при расчете с учетом стесненности температурных деформаций.

При расчете без учета стесненности температурных деформаций KT = 1.

KT := 1.3

$$\text{Prov\_8} := \begin{cases} \text{PR\_1} & \text{if } \max(|\sigma_{0m} + \sigma_{Rm}|, |\sigma_{0m} + \sigma_{Tm}|) > K_T \cdot \sigma_{20} \\ \text{PR\_2} & \text{if } \max(|\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}|, |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}|, |\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}|) \\ \text{PR\_3} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Prov\_8 = "Условия статической прочности в рабочих условиях выполняются"

$$\max(|\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}|, |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}|, |\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}|) = 821.077$$

$$K_T \cdot \sigma_{д.ф} = 234$$

$$\max(|\sigma_{0m} + \sigma_{Rm}|, |\sigma_{0m} + \sigma_{Tm}|) = 658.206$$

$$K_T \cdot \sigma_{20} = 239.2$$

4.13.4 Проверка углов поворота фланца:

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца:

$$\theta := M_p \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E}$$

$$\theta = 4.66 \times 10^{-3}$$

Допустимый угол поворота плоского фланца:

$$\theta_d := 0.013$$

$$1.3 \cdot \theta_d = 0.017$$

Prov\_9 :=  $\begin{cases} \text{"Условие при испытаниях НЕ выполняется"} & \text{if } \theta > 1.3 \cdot \theta_d \\ \text{"Условие в рабочих условиях НЕ выполняется"} & \text{if } \theta > \theta_d \\ \text{"Условия поворота плоского фланца выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Prov\_9 = "Условия поворота плоского фланца выполняется"

### 4.13 Укрепление отверстий

4.13.1 Расчет укрепления отверстий для штуцера ввода греющего пара в обечайку теплообменника

Исходные данные:

- внутренний диаметр аппарата, мм  $D = 325$ ;
- марка стали 12X18H10T;
- внутреннее расчетное давление, МПа  $P_{в.расч.} = 0,2$ ;
- исполнительная толщина стенки обечайки, мм  $s = 4$ ;
- диаметр отверстия под штуцер ввода пара, мм  $d = 90$ ;
- прибавка к расчетной толщине стенки, мм  $c = 2$ ;
- допускаемое напряжение стали при рабочих условиях, МПа  $\sigma_d = 171,5$ ;
- высота стандартного эллиптического днища, мм  $H = 82$ .

Расчетный диаметр отверстия в стенке обечайки:

$$d_{pl} = (d_{н.з.н.} + 2 \cdot c) = 90 + 2 \cdot 1.5 = 93.0 = 93.0 \text{ мм}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

Usl<sub>9</sub> =  $\begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left( \frac{d_{pl} - 2 \cdot c}{D_{з.к.}} > 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left( \frac{S - c}{D_{з.к.}} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Usl<sub>9</sub> = "Условия применения формул выполняются"

Расчетная толщина стенок укрепляемых элементов:

$$S_{p.y.o.1} = \frac{P_{в.расч.} \cdot D_{з.к.}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{в.расч.}} = 0.204 \text{ мм}$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле

$$s_{p1} = \frac{P_{н.расч.} \cdot (d_{н.з.н.} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{н.расч.}} = \frac{0.1 \cdot (90 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 171.5 \cdot 1 - 0.1)} = 0.0271 = 0.0271 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления в стенке цилиндрической обечайки

$$d_{0p.1} = 0.4 \cdot \sqrt{D_{з.к.} \cdot (S - c)} = 11.402 \text{ мм}$$

Для цилиндрических и конических обечаек

$$K_{1.1} = 1$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле:

$$d_{0.1} = \min \left[ 2 \cdot \left[ \left( \frac{S - c}{\frac{P_{\partial} \cdot D_{з.к.}}{2 \cdot K_{1.1} \cdot \sigma_D - P_{\partial}}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{з.к.} \cdot (S - c)}, D_{з.к.} + 2 \cdot c \right] = 227.935$$

$$Usl_{10} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия" if } d_{0.1} < d_{p1} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется" otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{10} = \text{"укрепление отверстия не требуется"}$$

4.13.2 Расчет укрепления отверстий для штуцера вывода конденсата греющего пара из обечайки теплообменника

Исходные данные:

- внутренний диаметр аппарата, мм  $D = 325$ ;
- марка стали 12X18H10T;
- внутреннее расчетное давление, МПа  $P_{в.расч.} = 0,2$ ;
- исполнительная толщина стенки обечайки, мм  $s = 4$ ;
- диаметр отверстия под штуцер ввода пара, мм  $d = 38$ ;
- прибавка к расчетной толщине стенки, мм  $c = 2$ ;
- допускаемое напряжение стали при рабочих условиях, МПа  $\sigma_D = 171,5$ ;
- высота стандартного эллиптического днища, мм  $H = 82$ .

Расчетный диаметр отверстия в стенке обечайки:

$$d_{p2} = (d_{н.кон.з.н.} + 2 \cdot c) = 38 + 2 \cdot 1.5 = 41.0 = 41.0 \text{ мм}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Usl_{11} = \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} if \left( \frac{d_{p2} - 2 \cdot c}{D_{2.к.}} > 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} if \left( \frac{S - c}{D_{2.к.}} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} otherwise \end{cases}$$

$Usl_{11} = \text{"Условия применения формул выполняются"}$

Расчетная толщина стенок укрепляемых элементов:

$$S_{p.y.o.2} = \frac{P_{в.расч.} \cdot D_{2.к.}}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi p} - P_{в.расч.}} = 0.204 \text{ мм}$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле

$$s_{p2} = \frac{P_{н.расч.} \cdot (d_{н.кон.г.н.} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi p} - P_{н.расч.}} = \frac{0.1 \cdot (38 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 171.5 \cdot 1 - 0.1)} = 0.012 = 0.012$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления в стенке цилиндрической обечайки

$$d_{0p.2} = 0.4 \cdot \sqrt{D_{2.к.} \cdot (S - c)} = 11.402 \text{ мм}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле:

$$d_{0.2} = \min \left[ 2 \cdot \left[ \left( \frac{S - c}{\frac{P_{\partial} \cdot D_{2.к.}}{2 \cdot K_{1.1} \cdot \sigma_{Д} - P_{\partial}}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{2.к.} \cdot (S - c)}, D_{2.к.} + 2 \cdot c \right] = 227.935$$

$$Usl_{12} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} if d_{0.2} < d_{p2} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} otherwise \end{cases}$$

$Usl_{12} = \text{"укрепление отверстия не требуется"}$

4.13.3 Расчет укрепления отверстий для штуцера ввода/вывода воды в эллиптическую крышку и из нее

Исходные данные:

- внутренний диаметр аппарата, мм  $D = 325$ ;
- марка стали 12X18H10T;
- внутреннее расчетное давление, МПа  $P_{в.расч.} = 0,1$ ;
- исполнительная толщина стенки обечайки, мм  $s = 4$ ;
- диаметр отверстия под штуцер ввода пара, мм  $d = 35$ ;
- прибавка к расчетной толщине стенки, мм  $c = 2$ ;
- допускаемое напряжение стали при рабочих условиях, МПа  $\sigma_{Д} = 175,5$ ;
- высота стандартного эллиптического днища, мм  $H = 82$ .



Расстояние от центра укрепляемого отверстия до эллиптической крышки:

$$x_2 = 0$$

Расчетные диаметры укрепляемых элементов

$$D_{p3} = \frac{D_{2.к.}^2}{2 \cdot H_6} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D_{2.к.}^2 - 4 \cdot H_6^2)}{D_{2.к.}^4}} \cdot x_2^2 = \frac{325^2}{(2 \cdot 82)} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \left[ \frac{(325^2 - 4 \cdot 82^2)}{325^4} \right]} \cdot 0^2 = 644$$

мм

Расчетный диаметр отверстия соединения штуцера ввода/вывода воды в крышку и днище:

$$d_{p3} = (d_{н.втор.н.} + 2 \cdot c) = 35 + 2 \cdot 1.5 = 38.0 = 38.0 \text{ мм}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Usl_{I3} = \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется" if } \left( \frac{d_{p3} - 2 \cdot c}{D_{p3}} > 0.6 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется" if } \left( \frac{S - c}{D_{p3}} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются" otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{I3} = \text{"Условия применения формул выполняются"}$$

Расчетная толщины стенок укрепляемых элементов:

$$S_{p.у.о.3} = \frac{P_{в.расч.} \cdot D_{p3}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{в.расч.}} = 0.184 \text{ мм}$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле

$$s_{p3} = \frac{P_{н.расч.} \cdot (d_{н.втор.н.} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{н.расч.}} = \frac{0.1 \cdot (35 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 175.5 \cdot 1 - 0.1)} = 0.0108 = 0.0108 \text{ мм}$$

Коэффициент для выпуклых днищ согласно [ГОСТ 34233.3-2017]:

$$K_{I.2} = 2$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле:

$$d_{0.3} = \min \left[ 2 \cdot \left[ \left( \frac{S - c}{\frac{P_{\partial} \cdot D_{p3}}{2 \cdot K_{I.2} \cdot \sigma_D - P_{\partial}}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p3} \cdot (S - c)}, 0.6 D_{p3} + 2 \cdot c \right] = 333.836$$

$$Usl_{I4} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия" if } d_{0.3} < d_{p3} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется" otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{I4} = \text{"укрепление отверстия не требуется"}$$

В результате расчетов можно сделать вывод, что необходимые условия выполняются. Следовательно, при данных диаметрах штуцеров обеспечивается жесткость конструкции.

## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В данном разделе выпускной квалификационной работы рассмотрены оценка перспективности разработки и планирование финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, предлагаемого в рамках НИ. Следует учитывать, что коммерческая ценность научного исследования складывается из таких факторов, как:

- востребованность на рынке;
- цена продукта;
- бюджет научных исследований;
- время продвижения продукта на рынок.

В данном разделе представлены следующие подразделы:

- Оценка коммерческого потенциала разработки;
- Планирование научно-исследовательских работ;
- Расчет материальных затрат научно-технического исследования;
- Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

Целевым результатом проведенной исследовательской работы стало получение активного вещества алюмината бария-кальция. Алюминат бария-кальция в основном синтезируют классическим (твердофазным синтезом), либо периодическим методом осаждения. Центральным аппаратом технологии выступает реактор непрерывного действия.

Расчеты проведены согласно рекомендациям, указанным в [1].

### **5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

В данном пункте проведем анализ потенциальных потребителей результатов исследования, анализ конкурентных технических решений, а также проведем SWOT-анализ.

#### **5.1.1 Анализ конкурентных технических решений**

Анализ МПК в сравнении с другими компаниями производителями катодов с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, позволяет выполнить оценку сравнительной эффективности проекта и определить направления для ее будущего повышения.

Оценить это можно с помощью следующих критериев:

- Энергоэкономичность – показатель полезной затраченной энергии на производство готовой продукции.
- Простота эксплуатации – основными показателями являются: управляемость, обслуживаемость, освояемость;
- Надежность – критерий, определяющий долговечность аппарата, используемого в производстве;
- Функциональная мощность – показывает как долго возможно сохранение заданного режима выхода продукта;
- Безопасность – наличие защитного кожуха;
- Ремонтопригодность – простота конструкции, доступ ко всем основным деталям аппарата;
- Доступность запасных частей – дешевизна и доступность деталей аппарата.
- Чистота конечного продукта – отсутствие примесей в конечном продукте;
- Воспроизводимость свойств продукта – постоянство свойств получаемого продукта.
- Цена – критерий, показывающий насколько выгоден данный проект, продукт или разработка.

Таблица 5.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентно-способность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии приборов</b>							
1. Энергоэкономичность	0,1	4	5	4	0,4	0,5	0,4
2. Простота эксплуатации	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
3. Надежность	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
4. Функциональная мощность	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
3. Безопасность	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
4. Ремонтопригодность	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,5

5.Доступность запасных частей	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
<b>6.метод непрерывного осаждения</b>							
6.1Чистота конечного продукта	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
6.2 Воспроизводимость свойств продукта	0,1	5	4	2	0,5	0,4	0,2
7. Цена	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
<b>Итого</b>	<b>1</b>				<b>4,8</b>	<b>4,0</b>	<b>3,9</b>

Б<sub>ф</sub> – продукт проведенной исследовательской работы;

Б<sub>к1</sub> – АО НПП «Торий»;

Б<sub>к2</sub> – АО «Катод».

По данным таблицы 5.1 можно сказать, что рассчитанный и подобранный реактор превосходит конкурентов по таким показателям как простота эксплуатации и надежность. Данные МПК для реактора надежнее, так как реактора конкурентов довольно долгое время находится в эксплуатации, что влияет на их надежность. Простота эксплуатации объясняется простым и доступным для любого производства методом получения конечного продукта. Такой аппарат конкурентоспособен не только своим характеристикам, но и по цене за счет низкой металлоёмкости, в связи с малыми габаритами реактора.

### 5.1.2 SWOT-анализ

Составление SWOT-анализа сводится к описанию сильных и слабых сторон рассчитанного аппарата, выявлению возможностей и опасностей для его реализации, которые проявились или же имеют все шансы возникнуть в процессе эксплуатации реактора для получения активного вещества для МПК.

Табличная конфигурация SWOT-анализ представлена в таблице 5.2

Таблица 5.2 – SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны проекта</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Простота и удобство в эксплуатации.</li> <li>2. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.</li> <li>3. Более низкая стоимость аппарата по сравнению с конкурентными производителями.</li> <li>4. Возможность получения других веществ.</li> </ol>	<p><b>Слабые стороны проекта</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Научная разработка, которая еще не применялась в промышленных масштабах.</li> <li>2. Существует необходимость более частого ремонта и обслуживания вала аппарата, так как это проблемная деталь.</li> </ol>
<p><b>Возможности</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Возможность увеличения производственного масштаба и выхода целевого продукта.</li> <li>2. Возрастание спроса на качественное активное вещество.</li> <li>3. Возможность использования данной технологической схемы для получения сорбентов и катализаторов.</li> </ol>		

<b>Угрозы</b> 1. Угроза нарушения технологического процесса, вследствие неправильной эксплуатации. 2. Угроза вырывания вала и нарушения перемешивающего устройства. 3. Угроза получения продукта с нежелательными примесями.		
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

На данном этапе необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Интерактивная матрица проекта отображена в таблице 5.3

Таблица 5.3 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	0	+
	B2	+	+	+	+
	B3	+	+	+	+

Проанализировав интерактивную таблицу можно записать следующую ее форму:

B2B3C1C2C3C4. Приведем результаты в итоговую матрицу SWOT– анализа в таблице 5.4

Таблица 5.4 – Итоговый SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны проекта</b> 1.Простота и удобство в эксплуатации. 2.Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. 3.Более низкая стоимость аппарата по сравнению с импортными производителями. 4.Возможность получения других веществ	<b>Слабые стороны проекта</b> 1.Научная разработка, которая еще не применялась в промышленных масштабах. 2.Существует необходимость более частого ремонта и обслуживания вала аппарата, так как это проблемная деталь.
<b>Возможности</b> 1. Возможность увеличения производственного масштаба и выхода целевого продукта. 2.Возрастание спроса на качественное активное вещество. 3.Возможность использования данной технологической схемы для получения сорбентов и катализаторов.	<b>Сильные стороны и возможности</b> 1.Подобрана технологическая схема, доступная для любого типа производства. 2.Расход реагентов задан таким образом, чтобы минимизировать потери и исключить излишки. 3.Аппарат имеет габариты, которые позволят затратить меньше металла для его сборки.	<b>Слабые стороны и возможности</b> 1.Внедрение данной технологической схемы в промышленные масштабы с дальнейшим выявлением слабых сторон и оптимизации производства. 2.Необходимость использования более долговечных и прочных материалов.

<b>Угрозы</b>	<b>Сильные стороны и угрозы</b>	<b>Слабые стороны и угрозы</b>
1. Угроза нарушения технологического процесса, вследствие неправильной эксплуатации. 2. Угроза вырывания вала и нарушения перемешивающего устройства. 3. Угроза получения продукта с нежелательными примесями.	1. Качественный подбор рабочего персонала, повышение квалификации рабочих, осуществление контроля над технологией. 2. Использование подходящего рода крепления вала, подбор износостойкой муфты, использование подшипников, обеспечивающих вибростойкость. 3. Строгий контроль качества исходного сырья.	1. Внедрение систем блокировки, выявляющих минимальные отклонения в работе аппаратов уже на начальном этапе. 2. Строгий контроль качества исходных веществ, предварительная очистка загружаемой в реактор смеси.

Проанализировав SWOT – анализ, можно сделать вывод, что для выхода на лидирующие позиции на рынке необходимо провести ряд следующих преобразований:

- После внедрения установки на производство, выявить слабые стороны и устранить их;
- Применять только качественные материалы, обеспечивающие долговечность и стабильную работу аппарата и установки в целом;
- Подбор персонала, способного качественно обслуживать оборудование и поддерживать оптимальную работу установки.

## **5.2 Планирование научно-исследовательских работ**

В этом подразделе будут разобраны структура работ в рамках научного исследования, определены трудоемкости выполнения работ, разработан график проведения и определен бюджет научного исследования.

### **5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования**



Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в чей состав входят: инженер(студент), научный руководитель, консультант по части социальной ответственности (СО) и консультант по экономической части (ЭЧ) выпускной квалификационной работы. Составим перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования.

Таблица 5.5 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность исполнителя
1	2	3	4
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Науч. руководитель, инженер
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, инженер
	4	Патентный обзор литературы	Инженер
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер
	7	Проведение экспериментов	Руководитель, инженер
	8	Сопоставление результатов экспериментов с теорией	Руководитель, инженер
Обобщение и оценка результатов	9	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, инженер
	10	Определение целесообразности проведения НР	Руководитель, инженер
Разработка технической	11	Расчет реактора непрерывного осаждения для производства	Инженер

документации и проектирование		активных веществ для металлопористых катодов	
	13	Оценка эффективности производства и применения разработки	Инженер
	14	Разработка социальной ответственности по теме	Инженер
Изготовление и испытание опытного образца	15	Получение опытного образца	Руководитель, инженер
	16	Лабораторные испытания опытного образца	Руководитель, инженер
Оформление комплекта документации по НР	15	Составление пояснительной записки	Инженер

### 5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Поэтому для ее расчета используются примерные ожидаемые затраты времени на различных этапах работы для каждого участника работы.

Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$  – ой работы, чел. – дн.;

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$  – ой работы, чел. – дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$  – ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее

неблагоприятного стечения обстоятельств), чел. – дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i},$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож\ i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел. – дн;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Временные показатели проведения научного исследования для каждого его участника занесены в таблицу 4.6.

Таблица 5.6 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работ	Трудоемкость работы															Исполнитель  и	Т <sub>р</sub> , раб. дн.					Т <sub>р</sub> , кал. дн.				
	t <sub>min</sub> , чел-дн.					t <sub>max</sub> , чел-дн.					t <sub>ож</sub> , чел-дн.															
	ь	Магистрант	Конс. ЭЧ	Конс. СО	Инженер	ь	Магистрант	Конс. ЭЧ	Конс. СО	Инженер	ь	Магистрант	Конс. ЭЧ	Конс. СО	Инженер											
Составление технического задания	0,2	0,2	0,2	0,2	0	1	1	1	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	Руководитель, инженер	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0
Выбор направления исследования	0,5	0,5	0	0	0	2	2	0	0	0	1	1	0	0	0	Руководитель, инженер	0,5	0,5	0	0	0	0,6	0,6	0	0	0
Подбор и изучение материалов	5	5	0	0	0	10	10	0	0	0	7	7	0	0	0	Руководитель, инженер	3,5	3,5	0	0	0	4,2	4,2	0	0	0
Патентный обзор литературы	0	7	0	0	0	0	10	0	0	0	0	8,2	0	0	0	Инженер	0	8,2	0	0	0	0	9,8	0	0	0

Календарное планирование работ по теме	1	1	0	0	0	2	2	0	0	0	1,4	1,4	0	0	0	Руководитель, инженер	0,7	0,7	0	0	0	0,8	0,8	0	0	0
Проведение теоретических расчетов и обоснований	0	3	0	0	0	2	5	0	0	0	0	3,8	0	0	0	Инженер	0	1,9	0	0	0	0	2,3	0	0	0
Проведение экспериментов	0	5	0	0	2	2	8	0	0	6	0	6,2	0	0	3,6	Руководитель, инженер	0	3,1	0	0	1,8	0	3,7	0	0	2,2
Сопоставление результатов с теоретическими исследованиями	2	3	0	0		3	5	0	0		2,4	3,8	0	0	0	Руководитель, инженер	1,2	1,9	0	0	0	1,4	2,3	0	0	0
Оценка эффективности результатов	3	5	0	0	1	4	6	0	0	2	3,4	5,4	0	0	1,4	Руководитель, инженер	1,7	2,7	0	0	0,5	2	3,2	0	0	0,6

Определение целесообразности проведения ВКР	5	5	0	0	0	7	7	0	0	0	5,8	5,8	0	0	0	Руководитель, инженер	2,9	2,9	0	0	0	3,5	3,5	0	0	0
Расчет реактора непрерывного осаждения для производства активных веществ для металлопористых катодов	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	2,4	0	0	0	Инженер	0	2,4	0	0	0	0	2,9	0	0	0
Оценка эффективности производства	0	5	5	0	0	0	10	10	0	0	0	7	7	0	0	Инженер	0	3,5	3,5	3,5	0	0	4,2	4,2	4,2	0
Разработка СО	0	7	0	7	0	0	10	0	10	0	0	8,2	0	8,2	0	Инженер	0	4,1	0	0	0	0	4,9	0	0	0
Приготовление опытного образца	3	14	0	0	0	4	28	0	0	0	3,4	19,6	0	0	0	Руководитель, инженер	1,7	9,8	0	0	0	2	12	0	0	0

Испытания опытного образца	3	5	0	0	1	4	7	0	0	2	3,4	5,8	0	0	1,4	Руководитель, инженер	1,7	2,9	0	0	0,5	2	3,5	0	0	0,6
Составление пояснительной записки	0	13	0	0	0	0	16	0	0	0	0	14,2	0	0	0	Инженер	0	14	0	0	0	0	17	0	0	0

При выполнении дипломных работ студенты становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем, поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

В рамках планирования научного проекта построены линейный и календарный графики проекта.

Линейный график представляется в виде таблицы.

Таблица 5.7 – Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО исполнителей)
1	Составление технического задания, выбор пути работ	5	11.02.20	15.02. 20	Швалев Ю.Б., Тасмасыс Д.С.
2	Подбор и изучение материалов	7	15.02. 20	21.02. 20	Швалев Ю.Б., Тасмасыс Д.С.
3	Патентный обзор литературы	11	21.02. 20	2.03. 20	Тасмасыс Д.С.
4	Календарное планирование работ	9	2.03. 20	10.03. 20	Швалев Ю.Б., Тасмасыс Д.С.
5	Теоретические и экспериментальные исследования, обобщение итогов	32	10.03. 20	9.04. 20	Швалев Ю.Б., Тасмасыс Д.С.
6	Разработка технической документации и проектирование	27	9.04. 20	5.05. 20	Тасмасыс Д.С.
7	Оформление комплекта документации	24	5.05. 20	28.05. 20	Тасмасыс Д.С.
<b>Итого</b>		<b>115</b>			

Диаграмма Ганта – это горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Данный график строится на основе таблицы 5.7.



Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$  – й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$  – й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

За базовый прием 2017 год.

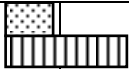


Таким образом:



$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 92 - 26} = 1,48.$$

Таблица 5.8 – Календарный план-график проведения по теме «Расчет и проектирование непрерывной технологии синтеза активных веществ для металлопористых термоэлектронных катодов» (диаграмма Ганта)

Вид работы	Исполнители	$T_{ki}$ , дней	Продолжительность выполнения работ										
			февраль		март			апрель			май		
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Составление технического задания	Руководитель, инженер	0,1											
Выбор направления исследований	Руководитель, инженер	0,6											
Подбор и изучение материалов	Руководитель, инженер	4,2											
Патентный обзор литературы	Инженер	9,8											
Календарное планирование работ	Руководитель, инженер	0,8											
Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер	2,3											
Проведение экспериментов	Инженер	3,7 2,2											
Сопоставление результатов	Руководитель, инженер	1,4 2,3											

экспериментов с теоретическими исследованиями													
Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, инженер	2,0 3,2 0,6											
Вид работы	Исполнители	$T_{ki}$ , дней	Продолжительность выполнения работ										
			февраль		март			апрель			май		
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Определение целесообразности проведения ВКР	Руководитель, инженер	3,5											
Расчет реактора для непрерывной технологии синтеза активных веществ для металлопористых термоэлектронных катодов	Инженер	2,9											
Оценка эффективности производства и применения разработки	Инженер	4,2											
Разработка социальной ответственности	Инженер	4,9											

Получение опытного образца	Руководитель, инженер	2 12											
Испытания опытного образца	Руководитель, инженер	2 3,5 0,6											
Составление пояснительной записки	Инженер	17											

Руководитель	Инженер
	

### 5.3 Бюджет научно- исследования

Планирование научного исследования должно обеспечивать полное и достоверное отражение всех видов расходов, используемых для его выполнения.

#### 5.3.1 Расчет материальных затрат НИ

Материальные затраты данного НТИ представлены в таблице 4.9.

Таблица 5.9 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена, руб/ед.
Термостат жидкостный	шт	1	36800
Весы электронные	шт	1	6400
Насос перистальтический	шт	3	15294
Насос вакуумный	шт	1	3000
рН-метр	шт	1	2500
Химические реагенты	кг	15	3000
Лаб. посуда	шт	10	1000
<b>Итого</b>			<b>62494</b>

#### 5.3.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

При выполнении научно-исследовательского проекта использовался ПЭВМ - Asus. Срок полезного использования данного ноутбука по паспорту составляет 3 года.

Таблица 5.10 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	ПЭВМ	1	3	30	30
<b>Итого</b>		30 тыс. руб.			

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации определяется по следующей формуле:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где  $n$  – срок полезного использования в годах.

Амортизация определяется по следующей формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m,$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;

$m$  – время использования, мес.

Рассчитаем норму амортизации для ноутбука, с учётом того, что срок полезного использования составляет 3 года:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{3} = 0,33.$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m = \frac{0,33 \cdot 30000}{12} \cdot 3 = 2475 \text{ руб.}$$

### 5.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ и дополнительную заработную плату. Также включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20-30 % от тарифа или оклада:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{\text{осн}}$ ).

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 8).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

(при 6-ти дневной рабочей недели  $M=10,4$  месяца при отпуске 48 раб. дней, при 5-ти дневной рабочей недели  $M=11,2$  месяца при отпуске 24 раб. дней)

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней.

Таблица 5.11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
календарное количество дней	365	365
Количество не рабочих дней: - выходные дни - праздничные дни	66	118
Издержки рабочего времени: - отпуск - невыходы по болезни	48	24
Действительный фонд рабочего времени	251	223

Месячный должностной оклад работника:

$$З_m = З_{ок} \cdot k_p,$$

где  $З_{ок}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_p$  – районный коэффициент, для Томска равный 1,3.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 5.12.

Таблица 5.12 – Расчет основной заработной платы

$З_{мс}$ , руб.	$k_p$	$З_m$ , руб.	$З_{дн}$ , руб.	$T_p$ , р. дн.	$З_{осн}$ , руб.
<b>Руководитель</b>					
33664	1,3	43763,2	1813,3	5	9066,48
<b>Инженер</b>					
9489	1,3	12335,7	575,3	62	35668,6

Общая заработная плата исполнителей работы представлена в таблице 5.13.

Таблица 5.13 – Общая заработная плата исполнителей

Исполнитель	$З_{осн}$ , руб.	$З_{доп}$ , руб.	$З_{ит}$ , руб.
Руководитель	9066,48	1088	10154,5
Инженер	35668,6	5557,95	41226,5

### 5.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}),$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

На 2020 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 № 212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность установлен размер страховых взносов равный 30%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в табл. 4.13.

Таблица 5.14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	9066,48	1088
Инженер	35668,6	5557,95
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	30%	
<b>Итого</b>	<b>15433,60</b>	

### 5.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование графических материалов, оплата услуг связи, электроэнергии, транспортные расходы и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:



$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (\text{сумма статей } 1 \div 4),$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов  $k_{\text{нр}}$  допускается взять в размере 16%. Таким образом, накладные расходы на данные НИИ составляют 21095.67 руб.

### 5.3.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 5.15.

Таблица 5.15– Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты НИИ	62494
Амортизация специального оборудования	2475
Затраты по основной заработной плате исполнителей работы	44735.08
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей работы	6710,26
Отчисления во внебюджетные фонды	15433.6
Накладные расходы	21095,67
<b>Бюджет затрат НИИ</b>	<b>152943,61</b>

Как видно из таблицы 5.15 основные затраты НИИ приходятся на материальные затраты.

### 5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на базе расчета интегрального показателя эффективности проекта. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{ri}$  – стоимость каждого варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения проекта.

$$I_{\text{фин.непр.}} = \frac{152943,61}{163118,1} = 0,94,$$

$$I_{\text{фин.период.}} = \frac{151413}{163118,1} = 0,93,$$

$$I_{\text{фин.золь.}} = \frac{163118,1}{163118,1} = 1.$$

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проводим в форме таблицы.

Таблица 5.16 – Сравнительная оценка характеристик данных разновидностей исполнения проекта

Объект исслед – я Критерии	Весовой коэффициент параметра	Непрерывное осаждение	Периодическое осаждение	Золь – гель технология
Время нахождения в реакторе	0,30	5	5	5
Время старения продукта	0,30	4	2	3
Способствует росту производительности труда	0,15	4	5	3
Энергосбережение	0,15	4	3	3
Использование отходов производства в качестве сырья	0,10	4	4	2
<b>Итого</b>	<b>1,00</b>	<b>4,3</b>	<b>3,7</b>	<b>3,5</b>

Интегральный показатель ресурсоэффективности для каждого исполнения:

$$I_{р.непр.} = 0.30*5 + 0.30*4 + 0.15*4 + 0.15*4 + 0,1*4 = 4,3$$

$$I_{р.период.} = 0.30*5 + 0.30*2 + 0.15*5 + 0.15*3 + 0,1*4 = 3,7$$

$$I_{р.золь.} = 0.30*5 + 0.30*3 + 0.15*3 + 0.15*3 + 0,1*2 = 3,5$$

Определяем интегральный показатель эффективности вариантов исполнения на основании выше рассчитанных показателей:

$$I_{непр.} = \frac{I_{р.непр.}}{I_{фин.непр.}} = \frac{4,3}{0,84} = 5,12$$

$$I_{период.} = \frac{I_{р.период.}}{I_{фин.период.}} = \frac{3,7}{0,94} = 3,94$$

$$I_{непр.} = \frac{I_{р.золь.}}{I_{фин.золь.}} = \frac{3,5}{1} = 3,5$$

Сопоставление интегрального показателя эффективности разновидностей выполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать более подходящий вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{ср}$ ):

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{и.}}{I_{непр.}}$$

Таблица 5.17 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Непр.	Период.	Золь.
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0.94	0,93	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	4.3	3.7	3.5
3	Интегральный показатель эффективности	5.12	3.94	3,5
4	Сравнительная эффективность разновидностей исполнения	1	0.77	0.69

## **6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

### **6.1 Правовые нормы трудового законодательства**

Регулирование отношений между работником и работодателем, касающихся оплаты труда, трудового распорядка, особенности регулирования труда женщин, детей, людей с ограниченными способностями и прочих, осуществляется законодательством РФ, а именно трудовым кодексом РФ. Согласно трудовому кодексу РФ каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- повышенные или дополнительные гарантии и компенсации за работу на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

Продолжительность рабочего дня не должна быть меньше указанного времени в договоре, но не больше 40 часов в неделю. Для работников до 16 лет – не более 24 часов в неделю, от 16 до 18 лет и инвалидов I и II группы – не более 35 часов.

Возможно установление неполного рабочего дня для беременной женщины; одного из родителей (опекуна, попечителя), имеющего ребенка в возрасте до четырнадцати лет (ребенка-инвалида в возрасте до восемнадцати лет). Оплата труда при этом производится пропорционально отработанному времени, без ограничений оплачиваемого отпуска, исчисления трудового стажа и других прав.

Организация обязана предоставлять ежегодный отпуск продолжительностью 28 календарных дней.

В течение рабочего дня работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается.

## **6.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны**

Перед запуском в работу проводится осмотр основного оборудования с целью устранения возможных проблем и неполадок.

Уровни физических, химических и биологических опасных и вредных производственных факторов, генерируемых производственным оборудованием в рабочую зону, а также воздействующих на работающего при непосредственном контакте с элементами конструкции, должны соответствовать требованиям безопасности, установленным нормативно-технической документацией, утвержденной в установленном порядке.

Рабочее место должно обеспечивать возможность удобного выполнения работ в положении стоя. При выборе положения работающего необходимо учитывать:

- физическую тяжесть работ;

- размеры рабочей зоны и необходимость передвижения в ней работающего в процессе выполнения работ;

- технологические особенности процесса выполнения работ (требуемая точность действий, характер чередования по времени пассивного наблюдения и физических действий, необходимость ведения записей и др.).

### 6.3 Производственная безопасность

Рассмотрим основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы при работе на рабочем месте.

Таблица 6.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Наименование видов работ	Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
	Физические		
		Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования.	ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ; ГОСТ 12.2.061-81 СББТ.
		Пожарная и взрывная безопасность	ГОСТ 12.1.010-76.
		Статическое электричество	ГОСТ 12.1.019-2017; ГОСТ 12.1.030-81.
		Повышенная температура рабочих поверхностей	СП 61.13330.2012.
		Электробезопасность	ГОСТ ИЕС 61140-2012.
	Отклонение показателей микроклимата рабочей зоны		СанПиН 2.2.4.548-96; ГОСТ 12.1.005-88.
	Превышение уровня шума		ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ; СНиП 23-03-2003.
	Превышение уровня вибрации		ГОСТ 12.1.012-2004 ССБТ.

	Химические		
	Повышенная запылённость рабочей зоны		ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ.
	Психофизиологические		
	Физическая нагрузка		Р 2.2.2006-05; ГОСТ 12.3.009-76 С СБТ.
	Монотонная работа		Р 2.2.2006-05.

#### **6.4 Анализ выявленных опасных производственных факторов**

В данном разделе более подробно разобраны выше перечисленные опасные факторы.

##### **6.4.1 Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования**

Движущийся транспорт на производстве можно встретить при получении и отгрузке готового продукта. Основополагающими причинами опасностей, связанных с движением транспорта является нарушение требований правил дорожного движения.

При эксплуатации производственного оборудования возникает опасность получения травм, а также возможны случаи с летальным исходом. Для предотвращения подобных ситуаций персонал обязан соблюдать технику безопасности при работе с машинами и механизмами, используемыми в технологической линии. К эксплуатации данного оборудования должны привлекаться только лица, имеющие соответствующую квалификацию и прошедшие инструктаж по технике безопасности при использовании оборудования. Также оборудование следует оснащать знаками безопасности согласно ГОСТ 12.4.026-2015 ССБТ.

##### **6.4.2 Пожарная и взрывная безопасность**

Обеспечение пожарной безопасности и пожаротушения возлагается на руководителя предприятия. Оснащение производственных зданий и территории промышленной площадки

первичными средствами пожаротушения и мероприятия по пожарной безопасности должны производиться в соответствии с правилами пожарной безопасности.

Местоположение первичных средств пожаротушения и пожарного инвентаря должно быть согласовано с органами пожарного надзора. Пожарные щиты с набором инвентаря (огнетушителями ОХП-10, ОУ-5 для тушения электрооборудования, ведра, лопаты, топор), и ящиками для песка  $V=1,0$  м<sup>3</sup> предусматриваются на выходе из помещений и здания цеха таким образом, чтобы не препятствовать вынужденной эвакуации людей.

#### **6.4.3 Статическое электричество**

Для предупреждения возникновения опасных искровых разрядов с поверхности оборудования, а также с тела человека необходимо предусматривать меры, уменьшающие величину заряда. Для обеспечения стекания возникшего электростатического заряда все металлические части аппаратуры, насосов и трубопроводных коммуникаций должны быть заземлены, а также должен осуществляться постоянный электрический контакт тела человека с заземлителем. Средства защиты от статического электричества должны соответствовать ГОСТ 12.4.124.

#### **6.4.4 Повышенная температура рабочих поверхностей**

В результате работы оборудования может возникнуть нагревание рабочих поверхностей. Поэтому, персонал должен быть оснащён перчатками во избежание термических ожогов, а также аппаратура подверженная чрезмерному нагреву должна оснащаться тепловой изоляцией в соответствии с СП 61.13330.2012. Необходимо предусмотреть защитные ограждения согласно ГОСТ Р 51342-99 для создания физической преграды, которая будет предотвращать приближение человека к источнику опасности и установить соответствующие предупреждающие вывески (плакаты) согласно ГОСТ 12.4.026-2015.

#### **6.4.5 Электробезопасность**

Действие электрического тока на организм человека носит многообразный характер. Проходя через организм человека, электрический ток вызывает термическое, электролитическое и биологическое действие. Термическое действие тока проявляется в ожогах тела, нагреве до высокой температуры внутренних органов человека (кровеносных сосудов, сердца, мозга).



Электролитическое действие тока проявляется в разложении органических жидкостей тела (воды, крови) и нарушении их физико-химического состава. Биологическое действие тока проявляется в раздражении и возбуждении живых тканей организма и сопровождается непроизвольными судорожными сокращениями мышц (сердца, лёгких)

Проектируемое рабочее место относится к помещениям без повышенной электроопасности, которое характеризуется отсутствием условий, создающих повышенную или особую опасность.

Основные способы и средства электрозащиты в соответствии с ГОСТ IEC 61140-2012: изоляция токопроводящих частей и ее непрерывный контроль; установка оградительных устройств; предупредительная сигнализация и блокировки; использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов; использование малых напряжений; электрическое разделение сетей; защитное заземление; выравнивание потенциалов; зануление; защитное отключение; средства индивидуальной электрозащиты; первичные и повторные инструктажи персонала по электробезопасности.

## **6.5 Анализ выявленных вредных производственных факторов**

В разделе анализа подробно рассмотрим вредные производственные факторы.

### **6.5.1 Отклонение показателей микроклимата рабочей зоны**

Постоянное отклонение метеоусловий на рабочем месте от нормальных параметров приводит к перегреву или переохлаждению человеческого организма и связанным с ними негативным последствиям:

- при перегреве – к обильному потоотделению, учащению пульса и дыхания, резкой слабости, головокружению, появлению судорог, а в тяжелых случаях – возникновению теплового удара;
- при переохлаждении возникают простудные заболевания, хронические воспаления суставов, мышц и др.

Профилактика перегревания осуществляется организацией рационального режима труда и отдыха путем сокращения рабочего времени для введения перерывов для отдыха в зонах с нормальным микроклиматом.

Согласно ГОСТ 12.1.005-88 при определенной температуре воздуха и скорости ветра работы приостанавливаются.

При работе в зимнее время года весь персонал должен быть оснащен спецодеждой с теплозащитными свойствами.

Измерение температуры воздуха в производственном цеху проводится ртутными термометрами.

### **6.5.2 Превышение уровня шума**

Шум, в общем случае, можно разделить на внешний и внутренний. Источниками внутреннего шума могут являться насосы, технологическое оборудование, вентиляционные установки и т.д. Источниками внешнего шума могут являться люди, автомобили, погодные условия.

Нормальным уровнем шума при работе в помещении считается 60 дБ. Под воздействием шума, превышающего 80-90 дБ, снижается слуховая чувствительность. Сильный шум вредно отражается на здоровье и работоспособности людей. Человек, работая при шуме, привыкает к нему, но продолжительное действие сильного шума вызывает общее утомление, может привести к ухудшению слуха.

Для снижения шума можно использовать следующие методы в соответствии с СНиП 23-03-2003 и ГОСТ 12.1.003-2014:

- уменьшение шума в источнике;
- изменение направленности излучения;
- рациональная планировка предприятий и цехов;
- акустическая обработка помещений;
- уменьшение шума на пути его распространения;
- применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов;
- применение дистанционного управления при эксплуатации шумящего оборудования.

Персонал оснастить защитными противοшумными наушниками и проводить периодические медицинские осмотры с прохождением аудиометрии.

### **6.5.3 Превышение уровня вибрации**

Вибрация, создаваемая машинами, механизированным инструментом и оборудованием, способна привести к нарушениям в работе и выходу из строя самих машин. Это может повлечь за собой возникновение аварийных ситуаций и, в конечном счете, неблагоприятных воздействий на

человека, получение им травм. Допустимые значения параметров транспортной, транспортнотехнологической и технологической вибрации устанавливаются ГОСТ 12.1.012-2004. Методы виброзащиты в основном организационные – использование средств индивидуальной защиты для защиты рук, ног, тела работника и установление внутрисменного режима труда. При превышении локальной вибрации на рабочем месте установленного уровня вводится ограничение времени ее воздействия:

при превышении предельно допустимого уровня (ПДУ) до 3 дБ длительность воздействия ограничивается 120-160 минутами;

- до 6 дБ – 60-80 мин;
- до 9 дБ – 30-40 мин;
- до 12 дБ – 15-40 мин;

при превышении более 12 дБ запрещается проводить работы и применять оборудование, генерирующее такую вибрацию.

#### **6.5.4 Повышенная запылённость рабочей зоны**

Повышенная запыленность рабочей зоны связана с процессом осаждения , фильтрации и прокаливания сырья, при котором образуется много мелкой пыли.

Для предотвращения вредного влияния на здоровье человека следует установить средства коллективной защиты (система вентиляции) и предусмотреть средства индивидуальной защиты (респираторы).

#### **6.5.5 Физическая нагрузка**

Физическая нагрузка может быть связана с перемещением сырья, работой с оборудованием, погрузкой готовой продукции и т.п. и обуславливать динамическую перегрузку.

Для предотвращения возникновения данного фактора следует применить следующие меры:

провести автоматизацию оборудования и линии для минимального задействования прямого человеческого труда;

разработать нормы и правила с целью уменьшить мощность и время действия физических нагрузок;

проводить отбор наиболее приспособленных к физическим нагрузкам;

проведение инструктажей и тренингов с целью изучения снижения физических нагрузок;

выделять средства для поддержания персоналом физической формы (абонементы в спортивные залы);

проводить спортивные мероприятия среди работников производства.

#### **6.5.6 Монотонная работа**

Монотонная работа отрицательно сказывается на эффективности производства: ухудшаются экономические показатели, повышается аварийность, травматизм, растет текучесть кадров.

Основные меры по уменьшению влияния монотонности на человека:

делать каждую операцию более содержательной, объединять малосодержательные операции в более сложные, содержательные и разнообразные;

осуществлять перевод работающих с одной на другую производственную операцию;

применять оптимальные режимы труда и отдыха в течение рабочего дня (рабочей смены): назначать короткие дополнительные перерывы для отдыха всей смены или отдельного работающего в удобное для него время.

## **6.6 Экологическая безопасность**

В данном разделе рассмотрим правила утилизации отработанного сырья и сырья, не прошедшего инспекционный осмотр, утилизация ТБО, люминесцентных ламп.

При разработке технологической линии возникает необходимость утилизировать производственные отходы, в качестве которых в данном случае выступают люминесцентные лампы, бумажные отходы (макулатура) и сырье различного вида.

Бумажные отходы следует передавать в соответствующие организации для дальнейшей переработки во вторичные бумажные изделия. Отработанные люминесцентные лампы должны передаваться либо государственным организациям, осуществляющим вывоз и уничтожение бытовых и производственных отходов, либо организациям, занимающимся переработкой отходов. Второй вариант является более предпочтительным, так как переработка отходов является перспективным направлением развития технологии. После проведенной процедуры составляется акт утилизации, а до нее – договор об утилизации, который должен быть предоставлен при проведении проверок службами Роспотребнадзора.

## 6.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее опасной чрезвычайной ситуацией на данном производстве следует принять возникновение пожар. Причинами возникновения данной ЧС могут являться:

- технические неполадки, в результате которых происходит отклонение технологических параметров, с последующим разрушением оборудования;
- неосторожное обращение с огнем при производстве ремонтных работ;
- события, связанные с человеческим фактором;
- внешнее воздействие техногенного или природного характера;
- повышенная температура воздуха и предметов.

Мероприятия, которые должны проводиться для обеспечения пожаробезопасности:

- предотвращение распространения пожара за пределы очага;
- применение конструкций производственных объектов с регламентированным пределом их огнестойкости и горючести;
- эвакуацию людей в случае пожара;
- применение средств индивидуальных и коллективных средств защиты от огня;
- применение средств пожарной сигнализации и средств извещения о пожаре;
- организацию пожарной охраны объекта;
- проведение инструктажа персонала;
- разработка и размещение плана эвакуации по периметру производственного помещения.

Необходимо, чтобы на блочном щите управления находили пенные, порошковые и водные огнетушители.

Все проходы должны быть свободными и иметь хотя бы два выхода, необходимо избегать длинных тупиковых проходов.

Средства тушения применять с учетом того, что является источником пожара. Для тушения горящей одежды использовать воду, для горящих электроустановок – углекислые огнетушители.

## Заключение

Методом непрерывного осаждения получены карбонат бария, карбонат кальция, гидроксид алюминия. Изучены основные стадии термической деструкции прекурсоров. Установлено, что осажденные вещества не содержат посторонних примесей. Полученные результаты дают основание полагать, что при осаждении трехкомпонентной системы, состоящей из азотнокислого бария, азотнокислого кальция и азотнокислого алюминия, осадок будет представлять собой смесь из карбоната бария, кальция и гидроксида алюминия. При прокаливании полученного осадка будет формироваться алюминат бария-кальция, который служит активным веществом в металлопористых термоэлектронных катодах.

Полученные лабораторные результаты, сравненные с их с литературными данными, позволяют предположить, что полученный методом непрерывного осаждения алюминат бария-кальция может быть использован в качестве активного вещества в технологии металлопористых термоэлектронных катодов.

Модернизация технологической схемы ставит цель перехода от лабораторной установки к промышленным масштабам и подбору промышленного оборудованию, с сохранением технологических параметров процесса получения активных веществ.

В данной работе для процесса синтеза активных веществ для металлопористых термоэлектронных катодов спроектирован реактор с перемешивающим устройством непрерывного действия и теплообменный аппарат нагрева воды в рубашку реактора.

Для аппаратов произведен материальный, тепловой, конструктивный и прочностной расчет. Аппараты соответствуют всем ГОСТам и обеспечивают заданную производительность конечного продукта.

Рассмотрены вопросы безопасности жизнедеятельности и экологичности на рабочем месте.

Произведен расчет технико – экономических показателей технологии получения активных веществ для металлопористых термоэлектронных катодов.





### Список публикаций студента

№ п/п	Наименование работы, ее вид	Форма работы	Выходные данные	Объем работы, с.	Соавторы
а) научные работы					
1	Расчет реактора для непрерывной технологии синтеза активных веществ для металлопористых термоэлектронных катодов	электронный ресурс	Томск : Изд-во ТПУ, 2018	2	А. О. Безматерных, Ю. Б. Швалев-
2	Расчет оборудования для непрерывной технологии синтеза активных веществ для металлопористых термоэлектронных катодов	электронный ресурс	Томск : Изд-во ТПУ, 2019.	2	Ю. Б. Швалев

### Список литературы:

1. Способ изготовления металлопористого катода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bankpatentov.ru/node/539595> (Дата обращения: 27.09.2017)
2. Лазарев В.Б., Соболев В.В., Шаплыгин И.С. Химические и физические свойства простых оксидов металлов. - М.: Наука. 1983. – 239 с.
3. Дюбуа Б.Ч., Култашев О.К., Поливникова О.В. Эмиссионная электроника, нанотехнология, синергетика (к истории идей в катодной технологии). // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-электроника. - 2008. Вып. 4 (497). – С. 3 – 22.
4. Фазовые превращения карбоната бария и кальция, гидроксида алюминия, полученных методом непрерывного осаждения - А.О. Безматерных, Ю.Б. Швалев, А.В. Килин
5. Т.М. Крачковская, Л.А. Мельников, Г.В. Сахаджи, А.Н. Пономарев, А.С. Емельянов – Металлопористый катод, модифицированный наноуглеродом - Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
6. Влияние структуры поверхности металлопористых катодов на их эмиссионные свойства / Б. Ч. Дюбуа, А. Г. Михальченков, О. В. Поливникова, М. П. Тимирязева // Электронная техника, серия 1, СВЧ-техника, 2010. – Вып. 1 (504). – С. 203–205.
7. Катодная электроника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.istokmw.ru/katodnaya-elektronika/> (Дата обращения: 05.10.2017)
8. А.А. Маклаков, Е.П. Остапченко. // Журн. струк. химии, 1960.– Т.1.– №2.– С.178–182.
9. Ю. В. Чеботаревский, А. В. Конюшин, Е. Л. Сурменко, Т. Н. Соколова, А. В. Попов Лазерная обработка поверхности метало-пористых катодов в целях улучшения эмиссионных характеристик электронных компонентов/Ю. В. Чеботаревский, А. В. Конюшин, Е. Л. Сурменко, Т. Н. Соколова, А. В. Попов//г. Саратов,13-15 мая 2011г – Саратов : Изд-во Саратовский государственный технический университет, 2011. — [С. 113-11].
10. Производители и постановщики вольфрама [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ru.all.biz/volfram-epg1057790> (Дата обращения: 07.10.2017)
11. Кудинцева Г.А., Термоэлектронные катоды. – М.-Л.: «Энергия», 1966 г. –265 с.

12. Металлопористый катод и способ его изготовления // Патент РФ № 2459305, 2012 г./Сахаджи Г.В., Конюшин А.В., Одинцова Ю.А., Попов И.А.
13. Иосилевич Л.Ш., Сахаджи Г.В, Сухов В.П., Данилина Е.Е. Автоматизирование технологических процессов ионно-плазменного травления и напыления при изготовлении импрегнированных металлопористых катодов для ламп бегущей и обратной волны, –2013. – 47 с.
14. Маклаков А. А., Способ получения барий-кальциевого вольфрамата //Бюллетень изобретений. –1960. –№17.
15. Aida, T. Emission life and surface analysis of barium-impregnated thermionic cathodes / T. Aida, H. Tanuma, S. Sasaki, S. Taguchi, N. Koganezawa and Y. Nonaka // J. Appl. Phys. –1993. –Vol. 74. – № 11. – P. 6482-6487.
16. Капустин В.И. Физико-химические основы создания многокомпонентных оксидсодержащих катодных материалов. // Перспективные материалы. - 2000. № 2. - С. 5 – 17.
17. Sato K., Sakura T., Kimura C. An improved dispenser cathode // Jnt. El. Dev. Meet.: IRC Rev. San Francisco, 1986. № 24. P. 59 - 64
18. Верменко Л.А., Гетьман О.И., Ракитин С.П. Влияние величины частиц порошка вольфрама на структуру и свойства металлопористых катодов (МПК) // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1980. № 11. С. 25–31.
19. Мельникова И.П. Разработка технологических процессов изготовления катодных систем с улучшенными физико-химическими характеристиками для мощных электровакуумных приборов: дисс. доктора технических наук. Саратовский гос. техн. Университет им. Гагарина Ю.А., Саратов, 2014.
20. Кудинцева Г. А. и др., Термоэлектронные катоды, М.- Л., 1966.
21. Никонов Б. П., Оксидный катод, М., 1979.
22. Золь – гель технология [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/5701968/page:17/> (Дата обращения: 27.09.2017)
23. Синтез алюмината бария с использованием золь-гель технологии
24. Дзисько В.А., Карнаухов А.П., Тарасова Д.В., Физико-химические основы синтеза окисных катализаторов; –Новосиб.; 1978. –380 с.
25. Электронный ресурс - <https://studopedia.org/8-12345.html> , дата обращения – 24.04.2018.
26. А.М. Кутепов, Т.И. Бондарева, М.Г. Беренгартен – Общая химическая технология; - Москва «Высшая школа»; 1990. – 68с.

27. Студопедия - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://studopedia.ru/1\\_122319\\_reaktor-idealnogo-vytesneniya-i-zavisimosti-kontsentratsii-reagenta-sa-i-stepeni-prevrashcheniya-ha-ot-dlini-reaktora.html](https://studopedia.ru/1_122319_reaktor-idealnogo-vytesneniya-i-zavisimosti-kontsentratsii-reagenta-sa-i-stepeni-prevrashcheniya-ha-ot-dlini-reaktora.html) (Дата обращения: 05.05.2018)
28. Реактор идеального вытеснения (РИВ) - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://poznayka.org/s79796t1.html> (Дата обращения: 05.05.2018)
29. X. Ye, W. Zhuang, C. Deng, W. Yuan, Z. Qiao. Thermodynamic investigation on the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--BaO}$  binary system // Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. – 2006. – V. 30. – P. 349–353.
30. Кикоин И.К. Таблицы физических величин: Справочник -М.: Атомиздат, 1976 – 1008с
31. Беляев В.М, Миронов В.М. Расчет и конструирование основного оборудования отрасли.
32. ГОСТ 20680-2002 “Аппараты с механическими перемешивающими устройствами”
33. ГОСТ 20680-75 “Аппараты с механическими перемешивающими устройствами вертикальные. Типы и основные параметры”
34. Павлов К.Ф, Романков П.Г, Носков А.А Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии.
35. Лашинский А.А. Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры.
36. ГОСТ Р 52857.2-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 36 с. — Государственные стандарты.
37. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи : учебное пособие для вузов / М. Ф. Михалев [и др.]; под ред. М. Ф. Михалева. — 2-е изд., испр. и доп.. — Москва: АРИС, 2010. — 310 с.: ил.. — Библиография: с. 308.. — ISBN 978-5-904673-05-5.
38. ГОСТ Р 52857.1-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 43 с. — Государственные стандарты.
39. ГОСТ Р 52857.4-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 121 с. — Государственные стандарты.

40. ГОСТ Р 52857.5-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 89 с. — Государственные стандарты.
41. Алгоритм расчета на виброустойчивость валов механических перемешивающих устройств: Методические указания к применению вычислительной техники в курсе "Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств" для студентов специальностей 0516, 0558 всех форм обучения / Сост.: В.Г. Доброногов, О.Г. Зубрий, Л.Г. Воронин. — К.: КПИ, 1988. — 52 с.
42. АКТ 24.201.17-90 – Мешалки. Типы, размеры, параметры, конструкция, основные размеры и технические требования
43. Охрана труда. Основы безопасности жизнедеятельности // www.Grandars.ru. 2016. URL: <http://www.grandars.ru/shkola/bezopasnost-zhiznedejatelnosti/ohrana-truda.html> (дата обращения: 17.05.2018).
44. Романенко С.В. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра, специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ/Сост. С.В. Романенко, Ю.В. Анищенко — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. — 11 с.
45. ГОСТ 12.0.003-74. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация // Библиотека ГОСТов. 2016. URL: <http://vsegost.com/Catalog/41/41131.shtml> (дата обращения: 17.05.2018).
46. ГОСТ 12.1.003–83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности //Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/5200291> (дата обращения: 17.05. 2018).
47. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны //Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003608> (дата обращения: 18.05. 2018).
48. ГОСТ 12.1.007–76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. //Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/5200233> (дата обращения: 18.05. 2018).
49. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. //Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901704046> (дата обращения: 18.05. 2018).

50. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки // Гарант информационно-правовое обеспечение URL: <http://base.garant.ru/4174553/> (дата обращения: 18.05. 2018).
51. СП 60.13330.2012 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха //Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095527> (дата обращения: 18.05. 2018).
52. СП 51.13330.2011. Защита от шума //Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200084097> (дата обращения: 29.03. 2018).
53. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности // Консультант плюс-надежная правовая поддержка URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_78699](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699) (дата обращения: 18.05. 2018).
54. ГОСТ 3885-73. Реактивы и особо чистые вещества. Правила приемки, отбор проб, фасовка, упаковка, маркировка, транспортирование и хранение //Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200017544> (дата обращения: 19.05. 2018).
55. Назаренко О. Б. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О. Б. Назаренко, Ю. А. Амелькович; Томский политехнический университет. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 178 с.
56. ГОСТ 12.4.011-89 (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация //Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200000277> (дата обращения: 19.05. 2018).
57. ГОСТ Р 12.4.013-97 ССБТ. Очки защитные. Общие технические условия //Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006186> (дата обращения: 19.05. 2018).
58. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты //Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200080203> (дата обращения: 19.05. 2018).
59. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации URL: [http://www.ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/2/2107/](http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/2/2107/) (дата обращения: 19.05.2018).

60. ГН 2.1.7.2041-06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве» //Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901966754> (дата обращения: 19.05. 2018).
61. ГН 2.1.5.1315-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования //Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901862249> (дата обращения: 19.05. 2018).
62. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.
63. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
64. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с.
65. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.

Приложение I  
(справочное)

**Social responsibility**

**Modernization of the technological scheme for producing active substances for the production of metal-porous thermoeffective cathodes with the development of basic equipment**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM81	Тасмасыс Дмитрий ергеевич		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Швалев Юрий Борисович	к.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Диденко Анастасия Владимировна	к.ф.н.		



## 1 LITERATURE REVIEW

In this chapter, the main varieties of metal-porous cathodes, properties of active substances and methods for their preparation will be described.

### 1.1 MPC and methods for their manufacture

Metal-porous cathodes (MPC) have taken a strong place in the production of electro vacuum devices.

Almost all the amplifiers produced in the world, based on traveling wave tubes or backward wave, ground and space communications, are made based on MPC. They are used for radar, television broadcasting, and cellular communications in order to obtain an electronic emission stream [2,6], etc.



Figure 1.1 – Varieties of cathodes [7]: a - oxide cathodes; b - metal-porous cathodes; c-metal alloy cathodes.

MPCs are cathodes emitting layer of which is a porous sponge made of a refractory metal (usually tungsten) placed in a molybdenum “glass” [8].

The incoming alkaline earth metals and oxides of these metals through the pores of the sponge form a monolayer on the emitting surface of the Ba-O-W type [9], which has low output work.

Currently, at the development stage, there is a technology for manufacturing MPC [5], in which nanocarbon material is used. The introduction of material into the cathode matrix can change the mechanism and the rate of three-phase reactions of the formation of active elements and oxygen and, therefore, improve its emission properties.

Promising materials for cathodes are alloys of noble metals (Pd, Pt, Ir) with rare earths metals (Ir, Ce, La).

The construction of a metal-porous (impregnated) cathode is shown in figure 1.2. It is a sponge 2 made of a refractory metal (W, Mo, Re), the pores of which are impregnated with an active substance (barium aluminate, calcium).

Impregnation is carried out by applying a metered amount of the active substance and impregnating a sponge at a temperature of 1700-1800 ° C in hydrogen. After impregnation, the excess of active substance remaining on the surface of the sponge and on the walls of the molybdenum case is removed by mechanical treatment, because of it the pores are rolling [11].

To open the pores, the method of ion-plasma etching of the surface [12], or the method of exposing the surface to pulsed laser radiation [13], is used. Because of the laser exposure, the sealed pores are opened to ensure the formation of micro holes evenly distributed over the emitting surface.

The technical result is the increase of uniformity of the distribution of micro-holes along the emitting surface of the cathode, the identity of their geometric dimensions, the increase of emissivity of the cathode, simplification and time reduction of the manufacturing process of the cathode.

Next is the fastening of the sponge 2 to the molybdenum case 1 (core) by rolling, soldering, or sintering. The heat from the tungsten filament 3 is transferred to the tungsten sponge 2 mainly due to radiation, which contributes to uniform heating [13].

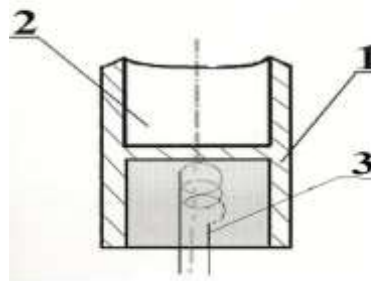


Figure 1.2 - Construction of the MPC: 1-Case, 2-metal-porous sponge, 3-heating element [9]

According to the method of producing the active substance, MPC are [9]:

- pressed;
- soaked;
- pressed-impregnated.

## 1.2 Active substances for metalloporous cathodes

The active substance filling the sponge pores of the cathode is a chemical compound of barium oxide with acidic and amphoteric oxides of some elements [3].

An important condition for the stable operation of the cathode is the correct selection of the active substance. The active substance should have the following basic properties [14]:

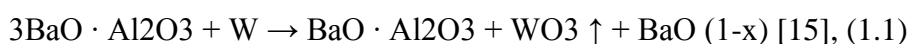
- ability to release the required amount of activator (barium) interacting with a reducing agent;
- low gas emission during cathode processing;
- sufficient resistance to air;
- specified melting point.

At the cathode activation stage at the temperature exceeding the operating temperature of the cathode, the formation of barium oxide crystals can occur only because of the interaction of barium aluminates with tungsten.

Due to thermodynamic limitations, direct decomposition of aluminates into barium and aluminum oxides is not possible.

The release of barium oxide is also difficult because of the interaction of aluminates with tungsten due to the volatility of tungsten oxide. In this case, oxygen is taken away from barium oxide by tungsten oxide [15]. It causes the formation of oxygen vacancies in barium oxide, which are responsible for its thermionic properties.

Conditionally, this reaction can be written as



where  $x$  is the deviation of barium oxide from stoichiometry, and the arrow at tungsten oxide indicates its transition to the gas phase [15]. According to the Le Chatelier – Brown principle, it shifts reaction (1.1) to the right.

Depending on the composition of the initial oxide phase, which is impregnated with the tungsten matrix, and the temperature on the left in the reaction (1.1), aluminate can be of the form [15]



or their eutectic mixture, where B is BaO, A is Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and the phases in the row are arranged in order of increasing barium oxide content.

In this case, each phase participating in reaction (1.1) turns into a phase located to the left of the row (1.2). Similarly to reaction (1.1), the interaction of calcium aluminate with tungsten with the formation of non-stoichiometric calcium oxide and volatile tungsten oxide can occur in the metal-porous cathode.

Thus, the scheme of the cathode material at the stage of its activation and operation can be represented as [16], shown in figure 1.3, where 1 – tungsten, 2 - aluminate, 3 - formed barium oxide crystallites, 4 - pores in the material, a - the average size of barium oxide crystallites, D - the average distance between the crystallites.

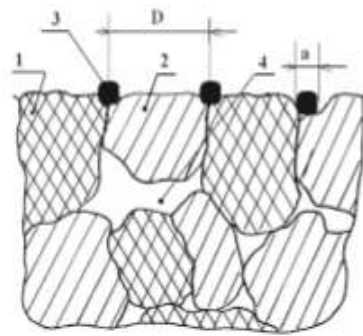


Figure 1.3 - Scheme of the formation of barium oxide crystallites in a metal-porous cathode [16].

The optimal value of the open pore channel also depends on the activity of the reaction of the impregnating substance with tungsten [17], as a result of which pressure is created in the volume of the cathode.

The less active aluminates include the following compounds:  $3\text{BaO} \cdot 0.5\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ; to more active ones:  $3\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  and aluminates annealed in an acidic atmosphere [17] containing carbon dioxide  $\text{CO}_2$ .

In cathode assemblies where it is possible to bombard the cathode surface with residual gases, which leads to an increase in  $\text{Ba} \uparrow$  sputtering, it is advisable to use frames with a lower density, as, for example, in [17], and higher permeability (0.44–0.48 kg / cm<sup>2</sup>). In this case, the density of the frames is calculated as follows [18]:

$$\rho_{\text{sp}} = (12.35 - 0.03 D_{\text{ch}} + 0.05 D_{\text{ch}}^2) - 0.6 \quad (1.3)$$

It is advisable to use less permeable  $\text{Ba} \uparrow$  sprays with density (1.4) using more active impregnating substance [18] or, for example, freshly prepared  $3\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  aluminate:

$$\rho_{\text{sp}} = (12.35 - 0.03 D_{\text{ch}} + 0.05 D_{\text{ch}}^2) + 0.6 \quad (1.4).$$

The most commonly used active substances are oxide systems:

$\text{BaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO} + \text{TiO}_2$ ,  $\text{BaO} + \text{ThO}_2$ ,  $\text{BaO} + \text{WO}_3$ ,  $\text{BaO} + \text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Annealing at a temperature of  $1650^\circ\text{C}$  contributes to the disappearance of the submicron fraction, a change in the fine structure of the particles, and, therefore, powder deactivation [19]. This is reflected in a decrease in shrinkage of W-frames during sintering. However, the full occurrence of this process at a temperature of  $1650^\circ\text{C}$  occurs in finer powders with a  $D_h$ , ref, from 1 to 3.5 microns. And only multistage annealing with a final temperature of  $1700^\circ\text{C}$  leads to a comparative equalization of the shrinkage of tablets from powders of different grades from 8.9 to 11.7%.

An even greater decontamination of the powder [19] occurs when it is processed with a temperature of  $1750^\circ\text{C}$ , increasing the temperature at each annealing step by  $25..50^\circ\text{C}$ . This contributes to the more intense reaction of tungsten with aluminate. Therefore, it is not advisable to increase the temperature of this process of powder annealing.

### 1.2.1 Compositions of active substances

The composition of the active substance is distinguished [20]:

- aluminate;
- tungstate;
- aluminosilicate;

According to the method of obtaining the active substance, distinguish [20,21]:

- Pressed [20,21] are made in the form of tablets or ceramic tubes by pressing a mixture of powders of active substances (oxides, aluminates, Ba tungstates) and powders of refractory tungsten metals or alloys of tungsten with other metals, for example Re.

- Impregnated [20,21] - a tungsten sponge is immersed in the melt of the active substance of the emission material and impregnated. The following compositions of active emission materials (tungstates Ba and Ba - Ca, scandates) and sponge materials (W, Ni, mixtures of W with Ir, Os) were distinguished.

The most common modifications that are often used in practice are cathodes with Ba - Ca aluminate with a density of up to  $10\text{ A} / \text{cm}^2$  at an operating temperature of  $1370\text{ K}$ . They are used in cathode ray tubes, microwave devices.

- Boride compounds [20,21].

The most widely used are compounds from lanthanum hexaboride (LaB6). These cathodes are used in thermal field emission mode at a high electric field strength ( $\sim 10^6$  V / cm), when a significant part of the emission current is due to field emission. High mechanical strength, resistance to electronic, and ion bombardment facilitate this. They are used in accelerators, vacuum devices operating in the conditions of a "bad" vacuum, without poisoning and providing high-density electron currents.

### **1.2.2 Methods for the preparation of active substances**

The main methods for producing active substances are distinguished:

- classic way;
- sol - gel technology;
- periodic deposition.

The classical method is solid-phase synthesis, in which aluminum oxides or hydroxides and barium carbonate, calcium carbonate are used as starting materials. However, this technique has significant drawbacks. Products synthesized in this way are not pure enough and have granulometric heterogeneity.

Sol-gel technology (sol-gel or spin on glass process) [22] is based on the ability of a colloidal solution or sol to coagulate, turning into gels. Gels are structured colloidal systems with a liquid dispersion medium.

Sol-gel technology is a convenient way to obtain dispersed materials, eliminates the numerous washing stages.

When using the classical nitrate sol-gel technology [23], hydroxycarboxylic acids are used as chelating and polymerizing agents. Citric acid is most often used. The use of citric acid as a complexing agent leads to the precipitation of barium nitrate with stirring for 1.5 hours. This is caused by the low stability of the barium citrate complex in strongly acidic media and the low solubility of barium nitrate in water.

The disadvantages of this method of obtaining active substances is the need to stabilize the complex of barium with organic reagents, and, consequently, a decrease in the concentration of nitrate ions.

Active substances are obtained by the method of periodic precipitation [24]. Barium - calcium tungstate is obtained by co-precipitation of tungstates and barium and calcium carbonates from aqueous solutions, followed by annealing of the precipitates formed.

The starting materials for producing barium - calcium tungstate are nitric acid salts of barium and calcium, ammonium tungstate and ammonium carbonate.

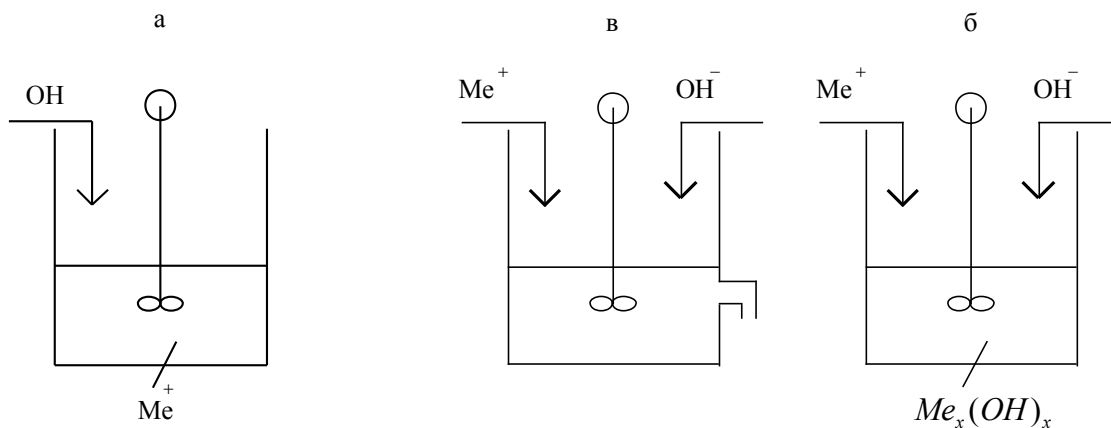
The method of continuous precipitation from solutions is known as the precipitation method used for the production of catalysts and sorbents, but it is not used to obtain active substances.

The active substances in this work were obtained by the continuous deposition method [4]. Solutions of aluminum nitrate, barium nitrate, and calcium nitrate were continuously precipitated at a temperature of 50 ° C, at a constant pH value of 7.5, sodium carbonate solution was used as a precipitant.

The method has several advantages [4]: purity of the final product, reproducibility of the results. Subsequently, the obtained substances can be used for the synthesis of the active phase for metal-porous thermionic cathodes.

Electron - microscopic images and X-ray diffraction patterns of barium - calcium tungstate indicate that cathodes made on the basis of barium - calcium tungstate obtained by deposition have better emission properties compared to cathodes obtained by sintering [11].

As can be seen from Figure 1.4, a continuous process in steady state allows you to fully ensure the constancy of all physico-chemical and technological conditions of deposition.



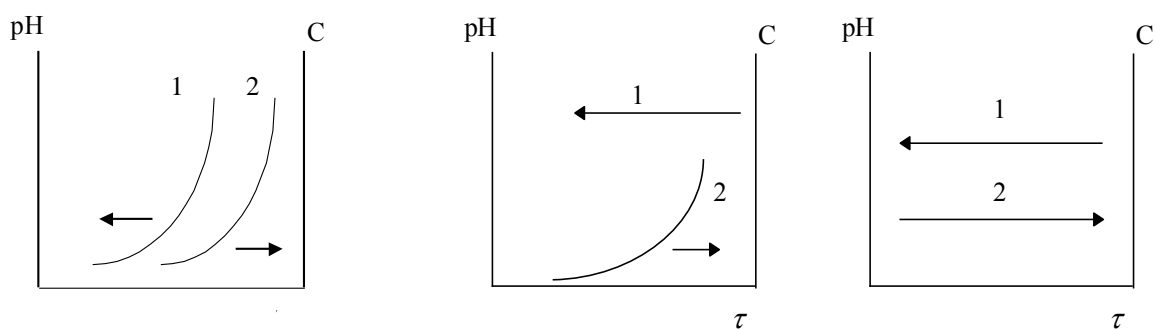


Figure 1.4 - Schematic representation of changes in sedimentation conditions during deposition by various methods [24]

a) -periodic method; б) semi-continuous method; в) a continuous method; 1 - pH; 2 - sediment concentration

Figure 1.4 shows that during the entire period of time, the pH and concentration of the precipitate remain constant. It suggests the possibility of obtaining a product of a chemically uniform composition.

In conclusion, the continuous deposition method has a great advantage over all of the above methods for producing active substances.